

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DPTO. DE INDUSTRIAS FORESTALES: Área Transformación Química

PRODUCTOS FORESTALES DE TRANSFORMACIÓN QUÍMICA

Transformación Química de la Madera

Copias del Curso

HÉCTOR ENRIQUE GONZALES MORA[θ]

LIMA, 2013

θ Ing. Forestal e Ing.Papelero; M.Sc. en Industrias Forestales, Ph.D. en Génie papetier, Profesor Principal del Dpto.Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria, La Molina

INDICE

TRANSFORMACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA

INTRODUCCION

Desde los primeros años de la civilización, el hombre ha sabido utilizar los recursos ofrecidos la naturaleza, con el fin de satisfacer sus necesidades básicas; estos recursos, utilizados directamente o transformados de diferentes maneras han servido para la elaboración de bienes sean de uso intermedio o final. El bosque ha sido y es una fuente inagotable de recursos: su principal producto, la madera, quizá el segundo material natural mas antiguo, conocido por el hombre. No se tiene referencia desde cuando la madera ha sido utilizada, pero se sabe que ha sido siempre empleada en la elaboración de herramientas para la caza, armas, material de vivienda, utensilios, muebles y vivienda. La forma de uso del recurso implicaba efectuar una modificación sea en forma y/o tamaño del material empleado. Asimismo, la madera ha tenido otra forma de uso importante: como combustible. esta forma de uso, diferente a las anteriores, permitía la generación de calor con la consiguiente transformación de la madera. Las transformaciones químicas, térmicas y enzimáticas, implica el cambio irreversible en su estructura, como es el caso de la madera utilizada como combustible o cuando se le transforma en carbón.

Los **procesos** de la madera (transformación química), con cambio de toda su estructura, implica una modificación parcial o total de su composición química; hay un cambio irreversible respecto a los componentes originales, tal como se entendería en un ejemplo simple para transformar la madera a carbón. Las **operaciones** con madera, a diferencia de los procesos, implican una transformación física o mecánica, donde se obtiene un cambio de forma del material, respecto a una dimensión original, pero la composición química sigue siendo la misma. La nueva morfología, implica un cambio irreversible en dimensiones, pero la proporción porcentual de sus componentes químicos es la misma tal como el material original; ver figura 1.1. Además, en el caso de madera, los cambios en su humedad por diferentes métodos, tambien se considera una operación ya que nunca existirá un cambio un cambio químico de los componentes cuando varian los contenidos de agua en la madera. Se menciona el caso de la obtención de madera laminada, de astillas o "chips"; en los dos casos la troza es llevada a la planta de transformación con el fin de convertirla, o reducirla, a formas o dimensiones adecuadas, según el uso final; sin embargo al efectuar el análisis químico respectivo se encontrará que las cantidades de celulosa o lignina serán iguales, antes y despues de la conversión. Al evaluar las diferentes formas de uso de la madera, la transformación química, con sus diferentes procesos, permite obtener productos tan diversos como son las pulpas celulósicas (para papeles, tableros y derivados celulósicos), carbón, alcoholes, alimento para ganado, productos fenólicos, plásticos, etc. Se remarca que en todos los casos hay un cambio en la estructura causado por acción de reactivos químicos y/o calor, aplicado por lo general, bajo condiciones controladas.

Una razón importante que ha permitido el desarrollo, a nivel mundial, de las industrias químicas con la madera se debe a la importancia del producto obtenido, de utilidad en la vida cotidiana, como es el caso del papel. Además, en la mayoría de los casos se obtiene un mejor aprovechamiento de la materia prima, lo que conlleva hacia el uso integral del árbol y tambien a la utilización de residuos generadas en otras industrias forestales. Un término moderno de la transformación química es el de Biorrefinerías, definida como una instalación donde se generan, de forma sostenible, productos químicos y derivados, de interés comercial a partir de la biomasa (Agencia Internacional de la Energía 2013). Sin embargo, se debe considerar que estas industrias químicas de la madera, a pesar de los avances tecnológicos, aún son causantes de diversas formas de contaminación ambiental. Las fábricas de pulpa, por su magnitud y por ser la más difundida, son las que generan más impacto ambiental, aunque en la actualidad las fábricas modernas han reducido de manera significativa sus emisiones. En la actualidad se desarrollan y aplican tecnologías para evitar o reducir el consumo de reactivos además de los programas de tratamiento de efluentes y control de emisiones gaseosas y de partículas a la atmósfera; estos métodos ya tienen aplicación efectiva en la industria química en general.

La industria de pulpa celulósica es la principal forma de transformación química forestal, destinada a la fabricación de papeles y cartones, tableros de fibras y derivados celulósicos, siendo la producción de papeles, la de mayor importancia como producto final a partir de la celulosa. El papel es un producto cuyo su consumo esta muy ligado al desarrollo industrial, económico y cultural de un país, lo que implica una gran demanda del material mencionado para su uso en envases y embalajes industriales, libros, diarios y revistas, papeles sanitarios e incluso revestimientos especiales en construcción de viviendas. Asimismo, la producción de tableros de fibras merece ser destacada ya que sus propiedades como material pueden ser reguladas de acuerdo al

destino final; los tableros pueden ser de baja densidad, aislantes, para uso como divisiones o techos aislantes en viviendas; los paneles de alta resistencia, se emplean en la elaboración de muebles etc.

Como industria química forestal también se considerar la obtención de derivados celulósicos como es el caso del rayón, nitrocelulosa, entre otros, obtenidos a partir de la pulpa soluble (∞ celulosa); sin embargo, su producción se da principalmente en regiones donde existe una carencia de fibras naturales vegetales (algodón o lino) base para la industria textil; precisamente el rayón, por sus características, es un producto competitivo con las fibras de algodón.

En el caso de las demás formas de transformación química con madera, estas no han llegado a tener la importancia de la celulosa, debida a la competitividad con otros productos sustitutos; en todo caso, son de desarrollo localizado o artesanal. Una razón de importancia que se esgrime en la falta de uso de los recursos forestales es que la industria química y derivados ha encontrado en el petróleo, gas natural y carbón mineral, como fuentes importantes de materias primas, de menor costo, que compiten con ventaja económica frente a la madera. Sin embargo, las nuevas tendencias de desarrollo y aprovechamiento de los recursos naturales, hacen que aún se mantenga en vigencia varias formas de conversión química forestal como son los procesos térmicos con la madera, aquellos que utilizan calor para el desarrollo del proceso (carbonización de la madera).

Se menciona a la carbonización de la madera con una importancia relativa en ciertos países como Brasil, donde se produce un carbón vegetal de buena calidad, para uso metalúrgico; en el Perú sucede algo similar, aunque en menor escala, en las zonas de Junín y Huánuco. Cabe agregar que el uso de este tipo de carbón como recurso energético se limitaría a un uso doméstico pero no industrial donde se descarta su consumo, por su mayor costo y menor poder calórico, comparado frente a las fuentes de calor tradicionales. De otro lado, la gasificación de la madera, como industria química se desarrolló entre las decadas del 30 al 50, principalmente en Europa con el fin de generar gas combustible para motores de combustión interna. En la actualidad el uso de gasificadores es restringido debido al bajo precio de los combustibles tradicionales; sin embargo la gasificación se plantea como una alternativa en zonas rurales que cuenten con un amplio recurso forestal, como es el caso de las comunidades de la selva tropical en el Perú. De este modo se puede utilizar madera para accionar pequeñas centrales térmicas (dendrotérmicas) que permitirian abastecer de fluído eléctrico a pequeñas poblaciones, con potencias entre 20 a 100 kW .

Otra actividad de transformación química de desarrollo limitado es la sacarificación de la madera, cuyo principal objetivo es la obtención de azúcares simples o carbohidratos degradados. Su mayor utilidad como complemento del alimento para ganado, con ventaja económica, relativa, en lugares con escasez de tierras para pastos o con limitaciones para la producción de forraje ganadero. Un derivado de la fermentación de los azúcares obtenidos es el etanol, que podría darle mayor valor agreagado a esta actividad, aunque los costos de producción deben ser reducidos para hacerlo competitivo frente a las metodos comunes de producción del etanol, como el que se obtiene a partir de la caña de azúcar en los paises de las regiones tropicales y subtropicales.

Por lo antes expuesto, se concluye que las industrias de transformación química de la madera pueden contribuir con multiples beneficios,al desarrollo local, regional y nacional, sobretodo en zonas con recursos forestales sin explotar o mal aprovechados, lo que aumentaría la rentabilidad del bosque. Es importante destacar este hecho pues los conceptos de desarrollo económico indican la necesidad de lograr el mejor aprovechamiento de los recursos naturales renovables. La armonía de los conceptos bien aplicados permitirá que se maximize la importancia del recurso forestal, tan venido a menos en el Perú en los últimos años. Hablar sólo de la gran magnitud de bosques no es suficiente si es que no aplican las mejores ideas y el mejor ingenio para aprovecharlas, y es seguro que las industrias químicas forestales son las mejores alternativas en la actualidad y en el futuro.

En el presente documento, dirigido a estudiantes de Ingeniería Forestal y carreras afines, se brinda información básica sobre la descripción de las principales industrias de transformación química de la madera, destacando las características de la materia prima requerida, usos principales y mención de ciertas posibilidades de desarrollo en el Perú. Previo al tema principal del documento, se hace una breve descripción de la Industria y su importancia económica. Al inicio del tema principal del documento se incluyen conceptos básicos sobre la química de la madera, tratando de destacar la importancia del conocimiento de la composición química y su relación con las industrias respectivas.

I. INDUSTRIA

Desde los albores de la civilización, el hombre ha sido capaz de satisfacer sus necesidad mediante la transformación y uso de bienes con una función específica; sea en la elaboración de un arma, un utensilio o la conservación de un alimento, siempre se requeria de efectuar una serie de actividades que conducian a la elaboración de un bien. Hasta el siglo XVIII, los bienes que se elaboraban eran destinados principalmente para un consumo personal o local, lo que no implicaba una presión en la producción. El aumento demográfico y las mayores relaciones comerciales entre continente, sobretodo entre los países de Europa y sus colonias, incide en un aumento de la producción de bienes en los paises colonizadores para su expendios en las colonias, con los consiguientes beneficios económicos. Si bien la actividad industrial ya se practicaba desde los inicios de la civilazción, el término industria cobra auge con la revolución industrial que se inicia en Inglaterra a mitad del siglo XIX. Desarrollos tecnológicos importantes se suceden en el siglo mencionado, como la invención de la máquina de vapor, de la electricidad, asi como se inicia la explotación del petróleo, lo que favorece enormemente el desarrollo industrial. Asimismo, esta revolución productiva exige una mayor demanda de recursos humanos y de materias primas: la actividad extractiva es predominante como forma de aprovisionamiento de materias primas de uso industrial.

Una definición genérica de la industria es la siguiente: Es un conjunto de recursos (bienes de capital, insumos, servicios) incluyendo la intervención de recursos humanos, necesarios para la transformación de un bien (materia prima) o de su producción. De otro lado, Una industria se define como el conjunto de todas las unidades de producción que se dedican primordialmente a un mismo tipo o tipos similares de actividades económicas productivas (ONU 2002).

Existen una gran diversidad de bienes que son considerados productos industriales por el simple hecho de haber sido sometidos a una etapa de transformación. sin embargo, la tendencia actual es lograr el mayor valor agregado en la transformación de un producto lo que puede implicar mas de una etapa de producción. Asi por ejemplo una empresa petrolera que solo se dedica a la extracción del petróleo invierte mas en su industria con el fin de refinar el petróleo, aplicar procesos de "craking" y mas aún desarrollar la petroquímica. Igual sucede con una empresa azucarera que inicialmente solo extrae el jugo de la caña, pero el mercado le exige que procese el producto, obteniendo el azúcar blanca o refinada. Una empresa maderera ya no se deberia conformar solo con obtener tablones de una troza, para su venta local, sino que deberá invertir en maquinarias para operaciones secundarias y obtener un producto de madera con el mayor valor agregado. en el siguiente punto se describen diferentes tipos de industrias clasificadas por la capacidad productiva de la empresa, por el tipo de bien que produce o por la magnitud de la inversión que requiere la industria.

CLASIFICACIÓN DE LAS INDUSTRIAS

A) POR CAPACIDAD PRODUCTIVA

Esta clasificación se refiere al nivel de producción que tiene la empresa productiva. Se toma como referencia sea la capacidad productiva o el personal que interviene en la producción. Hay que remarcar que el criterio de clasificación puede ser relativo por países: asi por ejemplo una fábrica de papel que produce 200 t/dia de papel puede ser considerada una industria de gran capacidad en el Perú pero en EEUU podría ser considera de mediana o pequeña capacidad; el tamaño medio de fábricas de papel en países como EEUU, Rusia o Canadá sobrepasan los 500 t de papel por día. Dentro de este grupo clasificatorio se ubican 4 tipos de empresas.

A.1. Industria Artesanal: Industria de muy pequeña capacidad de producción. Generalmente es una industria dedicada a elaborar un producto en una o pocas etapas; la elaboración de un bien suele ser espontáneo y en muchos casos guiado por la oportunidad comercial de un producto en el mercado. Su tecnología no es sofisticada y demanda poco personal para las etapas productivas. En muchos casos, es una empresa de caracter familiar y el conocimiento es transmitido dentro de un círculo muy reducido; el personal que interviene en el proceso de producción es por lo general en menos de 5 personas, que trabajan en un turno de trabajo. El expendio del producto se efectúa sin envolturas o empaques individuales o especiales; mas bien, el expendio se efectúa a granel o en empaques o bolsas que contienen más de un bien producido. La distribución es en zonas cercanas a la fuente de producción. Ejemplos: industria de panificación, producción de muebles en carpintería, elaboración casera de conservas para expendio, producción de carbón vegetal; este último es el caso de los productores de carbón en

Pucallpa y costa Norte del Perú (producción ilegal), etc.

A.2 Pequeña Industria: Es una empresa de pequeña capacidad productiva, pero con una organización mas estable. Es el modelo de empresa representativa del grupo de las PYMES. Su demanda de personal es pequeña, por lo general menos de 20 personas, que trabajan en uno o dos turnos de producción; exepcionalmente, en épocas de alta demanda aumenta su personal o los turnos productivos. La producción gira en torno a una etapa principal, que cuenta con el bien de capital más importante, y etapas auxiliares; la tecnología es globalmente simple, pero en la etapa principal requiere al menos de una persona calificada. Se suele aplicar métodos de evaluación de calidad al final de la producción y eventualmente en cada etapa. El expendio del bien se efectúa con empaques o envolturas individuales y el ámbito comercial de la empresa es más bien de carácter interdistrital. ejemplos de estas industrias se mencionan a las imprentas para tirajes cortos de libros o revistas (menos de 5000 u.), producción de madera aserrada (menos de 5000 pies tablares/dia); este último es el caso de casi todos los aserraderos que se ubican en Huancayo y la mayor de los que se ubican en Pucallpa.

A.3 Mediana Industria: La mediana industria es el tipo de industria que, individualmente ya gravita con importancia en la economía de una región del Perú. Se caracteriza por su capacidad productiva que demanda entre 50 a 200 personas distribuidos casi siempre en 3 turnos productivos. En la empresa existen más de dos etapas productivas importantes, cada uno con equipos o bienes de capital que demandan personal calificado, al menos uno en cada etapa. Los productos obtenidos requieren de un control permanente en cada etapa. Requiere de una planificación muy organizada de la producción. El ámbito de distribución de sus bienes es amplio, mayormente de carárter interdepartamental o nacional. Ejemplos de estas industrias son las fábricas de bebidas gasificadas (gaseosas), empresas de autopartes para muebles, autopartes de automóviles, fábricas de tableros contrachapados (caso de laminadoras de Pucallpa e Iquitos).

A.4 Gran Industria: Definitivamente, es el tipo de industria que tiene un gran impacto en la economía nacional e internacional. Estas empresas suelen emplear mas de 200 personas, varios casos con mas de mil, y en tres turnos productivos. La planificación de la producción es permanente y con mucha anticipación. Constantemente se efectúa control de calidad y de proceso en cada etapa, requiriendo personal especializado por etapa y por turno. La planificación de esta industria prevee siempre asegurar el abastecimiento de las materias primas e insumos, de gran demanda, que interviene en la producción. La presentación de los productos requiere de mucha descripción sea en envolturas o catálogos descriptivos del producto. En la gran industria se producen bienes de capital (metalmecánica), bienes de alta tecnología (informática o automóviles), bienes de uso intermedio (pulpas celulósicas o vidrio), o bienes perecibles pero de gran demanda (papel).

B) POR TIPO DE BIEN PRODUCIDO

B.1 Producción de energía

La energía es un insumo indispensable en la sociedad moderna: se requiere de energía eléctrica sea para alumbrado o consumo doméstico, sea para uso comercial o industrial. Otros tipos de energía, como la e. calórica, son de autogeneración en las propias empresas que la consumen. Las necesidades actuales de energía eléctrica son tan grandes que su uso requiere de una generación de nivel de gran industria. El nivel de consumo depende del tamaño poblacional de una ciudad y/o de su desarrollo comercial e industrial. En grandes urbes, el consume alcanza niveles de MW y hasta GW; por el contrario en ciudades pequeñas y caserios los niveles de consumo son de kW. En zonas favorecidas geográficamente, se genera energía eléctrica através de centrales hidroeléctricas: este es el caso de la sierra del Perú, donde se aprovecha las masas de agua ubicadas a grandes alturas (mas de 4000 msnm) que sirven para la generación de electricidad consumida principalmente en la zona costera. Otras formas de producción de electricidad es através de las centrales termoeléctricas, que utilizan principalmente combustibles líquidos (derivados del petróleo) y gaseosos (gas natural y gas de sintesis). Este tipo de centrales térmicas tambien se adaptan para el consumo de combustibles sólidos como es el caso del carbón y biomasa vegetal; en este último caso, cuando se utilizan biomasa del bosque (troncos, ramas, follaje) la planta adopta el nombre de planta dendrotérmica. De las plantas denominadas centrales o plantas nucleares para electricidad, se aprovecha la energía radioactiva que convertidad en energía calórica (vapor de agua) es suficiente para accionar turbinas y por consiguiente electricidad en muchas ciudades, principalmente de Europa. Las plantas nucleares suelen dejar un residuo radioactivo difícil de manipular, mientras que en las plantas térmicas, salvo el volumen de cenizas dejados por la biomasa, el riesgo es menor.

B.2 Extracción de bienes

La industria de extracción de bienes es la industria típica de los siglos XVIII y XIX que caracterizó a los países mas desarrollados de la época. Sin embargo, en la actualidad esta forma de obtener bienes permanece como principal fuente económica de muchos países, con bajo nivel de desarrollo. Se caracteriza la industria extractiva por el poco valor agregado al bien producido, casi nulo, el bajo nivel tecnológico aplicado en la elaboración o extracción del bien. Sin embargo los niveles de producción son sumamente altos. Este es el caso de extracción y refinación de minerales (Perú, Chile, Zambia, etc.), extracción y/o refinación de petróleo (Arabia Saudita, Kuwait, Venezuela,etc.) y gas natural (Rusia), extracción y transformación primaria de la madera (Chile, Brasil, Canadá, Indonesia, etc.).

B.3 Transformación de bienes

En este caso se refiere en la práctica a la verdadera industria que predomina en el mundo. La transformación de bienes corresponde a la evolución desde la industria extractiva. El desarrollo tecnológico, motivado por la revolución industrial, permitió a muchos paises darle mayor valor agregado a los bienes que producian. Aquellos paises que lograron darle mayor valor agregado a sus bienes son los que en la actualidad clasifican dentro del grupo de los paises desarrollados. Sin embargo, las fluctuaciones económicas y escasez de materias primas han obligado a replantear nuevas estrategias económicas de las empresas industriales. La expansión de las grandes empresas industriales (transnacionales), el aseguramiento en el abastecimiento de materias primas y las políticas mundiales de globalización son estrategias planteadas para asegurar la rentabilidad de las empresas industriales.

Dentro del grupo de empresas de transformación de bienes se menciona:

b.3.1 Industria básica

Se elaboran bienes de consumo intermedio, que son de gran demanda para la elaboración industrial de otros bienes. Se mencionan en este caso a la industria de la metalurgia (producción de acero, de aluminio), industria del vidrio (vidrio para automoviles, para laboratorio, ventanas), industria del cemento (para la construcción), industria de plásticos (para embalajes, plásticos rígidos), industria de pulpas celulósicas (para producir papeles y cartones, fibras sintéticas).

b.3.2 Industria de bienes perecibles

Los bienes perecibles son de consumo final, que pueden necesitar de un corte o redimensionamiento para producir el bien final. Este es el caso de la industria textil (telas para confección de ropa), industria alimentaria, industria de papeles y cartones (para cuadernos, embalajes). El concepto de bien perecible esta referido al tiempo relativamente corto de consumo o de su utilidad: inmediato en el caso de alimentos, de dias o semanas en papeles y cartones, o de meses en el caso de vestimentas.

b.3.3 Industria de bienes duraderos

Los bienes duraderos son producidos con el fin de satisfacer una necesidad, pero cuya vida útil es de un período relativamente largo. Corresponde a este tipo la industria automóviles, fabricación de artefactos eléctricos, industria de bienes de informática.

b.3.4 Industria de bienes de capital

Los bienes de capital, en su mayor parte, son máquinas y equipos de importancia en la elaboración de otros bienes industriales. Corresponde en este caso a la industria denominada metal-mecánica, fabricación de tractores, etc.

C) POR MAGNITUD DE LA INVERSIÓN

Aqui se toma como referencia la dimensión de la empresa, del tamaño de la inversión efectuada y del número de etapas que intervienen en una industria.

C.1 Industria ligera

Cuando el número de etapas es relativamente pequeña y simplicidad en la transformación, se puede calificar a la industria como ligera. Es el caso de la agroindustria donde por ejemplo solo se da un valor agregado de para la preparación y conservación de vegetales destinados a la alimentación. De igual manera, se califica como industria ligera la transformación primaria de la madera.

C.2 Industria pesada

En este caso, la magnitud de la inversión es relativamente grande y existen una gran diversidad de etapas necesarias para lograr producir el bien. Se menciona como ejemplo la industria de automóviles; tambien se mencionan, por la magnitud de la empresa, necesaria por economía de escala, la industria petroquímica y la industria de celulosa y papel.

D) POR SECTOR ECONÓMICO-

PRODUCTIVO

D.1 Industria Pesquera
Transformación de productos ictiológicos
D.2 Industria Minera (Metalurgia)
Transformación o concentración de metales
D.3 Industria Agrícola (Agroindustria)
Transformación de productos agrícolas y pecuarios
D.4 Industria textil
Producción de hilados y telas
D.5 Industria farmacéutica
Elaboración de fármacos

E) POR TIPO DE TECNOLOGÍA

Esta clasificación se hacec en función del tipo de tecnología aplicada en la etapa principal de la industria.

E.1 Industria Química
Presencia de reacciones químicas para la elaboración o transformación de un producto (papel, jabones, hilados, alimentos, caucho, fibras sintéticas etc.)

E.2 Industria Metal-mecánica
Aplicación de tecnología mecánica para elaboración de maquinarias, piezas y partes, principalmente cn metales y aleaciones (automóviles, barcos)

E.3 Industria manufacturera
Elaboración de un bien de forma manual o con ayuda de máquinas (calzado, muebles, vestimentas)

E.4 Industria electrónica
Elaboración de equipos de medición, precisión o para comunicaciones (radio, televisión, informática, informática)

PARÁMETROS TÉCNICOS PARA EVALUAR UNA INDUSTRIA

♦ **Producción (global, por sección)**
Cantidad de bienes producidos respecto a una unidad de tiempo. La producción de una empresa idustrial esta influenciada por diversos factores: calidad y estado de las maquinarias, eficiencia del personal que interviene en la producción, calidad de la materia prima.

♦ **Productividad**
Es un valor referencial de producción relacionado con la capacidad de las máquinas y personas que intervienen en la producción. Suele ser interpretado como la capacidad máxima de producción, para un bien determinado. El valor de productividad en una empresa industrial esta condicionado a los factores limitantes.

♦ **Rendimiento**
Es la relación de conversión entre una materia de entrada en la producción con el bien producido. Las expresiones de estas relaciones, de tipo ponderal (m/m), volumétrica (v/v) o combinadas (m/v; v/m) se indican en porcentajes.

♦ **Residuos y Efluentes**
Materias o sustancias residuales, resultantes del proceso de producción, que suelen ser eliminadas, tratadas, recuperadas y/o reutilizadas.

♦ **Eficiencia de máquina**
Relación de la capacidad de producción máxima de una máquina con la producción real actual., para un producto determinado y en un tiempo definido.

♦ **Factores limitantes ("cuello de botella")**
Se refiere a una etapa de producción, una máquina, un proceso u operación cuyo funcionamiento no sincroniza con las demás etapas de producción lo que ocasiona una interrupción momentánea del proceso o la disminución de la producción.

NECESIDADES GENERALES PARA ESTABLECER UNA INDUSTRIA

- ♦ **Materia prima e insumos**
- ♦ **Mano de obra**
- ♦ **Terreno**
- ♦ **Agua y desague**
- ♦ **Energía**
- ♦ **Mercado**

LA INDUSTRIA FORESTAL

La industria forestal se caracteriza por alta dependencia con la madera, como principal producto del bosque; otros productos son ocasionalmente aprovechados, dependiendo de su valor actual. La corteza puede ser aprovechada, si es conveniente, con fines energéticos; en bosques ee pinos, la corteza es aprovechada por sus componentes químicos (taninos, fenoles). Las hojas es materia que queda como materia orgánica en el bosque; en plantaciones de eucalipto son aprovechadas como fuente de obtención de aceite esencial.

La madera tiene requisitos que dependen del producto final: selección de la especie, características silviculturales y de calidad de madera son necesariamente tomados en cuenta; el aspecto económico es un factor horizontal para todos los requisitos. La integración de actividades entre el bosque y la industria debe ser armonizada para una interacción de equlibrio en los aspectos

socio económicos, ecológicos y tecnológicos (Rojas 1995).

La elección de una especie forestal maderable y la producción
NOTA: revisar estado de la industria nacional y la industria forestal
fuente: Perú Forestal (lNRENA) y Perú en cifras (Cuanto S.A.)

CLASIFICACIÓN INDUSTRIAL INTERNACIONAL UNIFORME DE TODAS LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS

(CIIU) (ONU 2002)

I. ESTRUCTURA GENERAL

Las distintas categorías de la CIIU se han agregado en las 17 secciones siguientes:

Sección	*Divisiones*	*Descripción*
A	01, 02	Agricultura, ganadería, caza y silvicultura
D	15-37	Industrias manufactureras

A. AGRICULTURA, GANADERÍA, CAZA Y SILVICULTURA

La sección A abarca la explotación de los recursos naturales vegetales y animales.

Comprende las actividades de cultivo, cría de animales, explotación maderera y recogida de otras plantas y captura de animales en sus hábitat naturales.

02 SILVICULTURA, EXTRACCIÓN DE MADERA Y ACTIVIDADES DE SERVICIOS CONEXAS

La silvicultura abarca la producción de madera en pie y la extracción y recolección de productos forestales silvestres, excepto hongos, trufas, bayas y nueces.

Además de la producción de madera, la silvicultura permite obtener productos que se someten a poca elaboración, como la leña o la madera para uso industrial (como, por ejemplo, estemples o madera para pasta maderera).

Otras actividades de elaboración de la madera, empezando por el aserrado y el cepillado, que suelen realizarse fuera de la zona de tala, se clasifican en la división 20 (Producción de madera y fabricación de productos de madera).

020 Silvicultura y extracción de madera y actividades de servicios conexas

0200 Silvicultura y extracción de madera y actividades de servicios conexas

Actividades comprendidas:

— explotación de madera en pie: plantación, replante, trasplante, aclarado y conservación de bosques y zonas forestadas
— explotación de monte bajo y madera para pulpa maderera
— explotación de viveros de árboles
— cultivo de árboles de Navidad
— extracción de madera: tala de árboles y producción de madera en bruto, como entibos, trozos, estacas o leña
— actividades de servicios forestales: inventarios forestales, evaluación de existencias valorables, lucha y protección contra los incendios, ordenación forestal, incluso forestación y reforestación
— actividades de servicios de corta: transporte de troncos dentro del bosque
— producción de carbón, cuando se realiza en el propio bosque

Otras actividades comprendidas:

— recolección de productos forestales silvestres, excepto hongos, trufas, bayas o nueces: balata y otras gomas similares al caucho, corcho, goma laca, resinas y bálsamos, crin vegetal y crin marina, bellotas, castañas de Indias, musgos y líquenes

Actividades no comprendidas:

— cultivo y recolección de hongos o trufas; véase 0112
— recolección de bayas o nueces; véase 0113
— producción de trozos de madera; véase 2010
*— producción de carbón por destilación de madera; corresponde a Sec. D - 2411 (*Fabricación de sustancias químicas básicas, excepto abonos y compuestos de nitrógeno*)*

D. INDUSTRIAS MANUFACTURERAS

Se entiende por industria manufacturera las actividades de las unidades que se dedican a la transformación física y química de materiales, sustancias o componentes en productos nuevos. Los materiales, sustancias o componentes transformados son materias primas procedentes de la agricultura, la ganadería, la silvicultura, la pesca y la explotación de minas y canteras, así como de otras actividades manufactureras.

Las unidades de la sección de industrias manufactureras se suelen describir como plantas, factorías o fábricas y se caracterizan por la utilización de maquinaria y equipo de manipulación de materiales que funcionan con electricidad. Sin embargo, las unidades que transforman materiales o sustancias en nuevos productos manualmente o en el hogar del trabajador y las que venden al público productos confeccionados en el mismo lugar en el que se venden, como panaderías y sastrerías, también se incluyen en esta sección.

Las unidades manufactureras pueden elaborar los materiales o contratar a otras unidades para que elaboren esos materiales en su lugar. Las industrias manufactureras abarcan ambos tipos de unidades.

El nuevo producto de una unidad manufacturera puede ser un producto acabado, en el sentido de que está listo para su utilización o consumo, o semiacabado, en el sentido de que constituye un insumo para otra industria manufacturera. Por ejemplo, el producto de las refinerías de alúmina es el insumo que se utiliza en la producción primaria de aluminio; el aluminio primario es el insumo de las fábricas de alambre de aluminio; y el alambre de aluminio es el insumo de las unidades que fabrican productos de alambre.

El montaje de componentes de los productos manufacturados también se considera una actividad de la industria manufacturera. Comprende el montaje de productos manufacturados a partir de componentes de producción propia o comprados. El montaje *in situ* de componentes de construcción prefabricados de producción propia se clasifica como actividad de la industria manufacturera cuando la fabricación y el montaje son actividades integradas. Cuando el montaje corre a cargo de unidades distintas, la actividad se clasifica en la división 45 (Construcción). Por lo tanto, cuando las partes no son de producción propia, el montaje de partes prefabricadas de puentes, depósitos de agua, instalaciones de depósito y almacenamiento, estructuras aéreas y de ferrocarril, ascensores y escaleras mecánicas, tuberías, rociadores contra incendios, sistemas de calefacción central, ventilación y acondicionamiento de aire, instalaciones de luz, electricidad y telecomunicaciones en edificios, y toda clase de estructuras, se clasifica bajo Construcción.

El montaje y la instalación de maquinaria y equipo en minas, fábricas, edificios comerciales y otros establecimientos, cuando constituyen una actividad especializada, se incluyen en la clase correspondiente a la industria manufacturera de tal maquinaria y equipo.

El montaje y la instalación de maquinaria y equipo realizados como un servicio conexo de la venta de los productos por una unidad que se dedica principalmente a la fabricación o al comercio al por mayor o al por menor se incluyen en la clase correspondiente a la actividad principal realizada por tal unidad.
Las actividades de unidades que se dedican principalmente a mantener y reparar maquinaria y equipo industrial, comercial y de índole similar se incluyen, por regla general, en la misma clase de industria manufacturera que las de las unidades que se especializan en la fabricación de esos bienes. Sin embargo, las unidades que se dedican a reparar maquinaria de oficina e informática se incluyen en la clase 7250. Las unidades cuya principal actividad consiste en reparar aparatos, equipo y mobiliario domésticos, vehículos automotores y otros bienes de consumo se incluyen, por regla general, en la clase pertinente de la división 50 (Venta, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas; venta al por menor de combustible para automotores) o de la división 52 (Comercio al por menor, excepto el comercio de vehículos automotores y motocicletas; reparación de efectos personales y de enseres domésticos), según el tipo de bienes que se reparen.
Las modificaciones, renovaciones y reconstrucciones importantes de bienes se consideran parte de la industria manufacturera.
La fabricación de componentes, piezas, accesorios y aditamentos especiales de maquinaria y equipo se incluye, por regla general, en la clase correspondiente a la fabricación de la maquinaria y el equipo a que tales componentes, piezas, accesorios y aditamentos se destinen. La fabricación de componentes y piezas no especiales de maquinaria y equipo (por ejemplo, motores, émbolos, motores eléctricos, ensambladuras eléctricas, válvulas, engranajes y cojinetes de rodillo) se incluyen en la clase pertinente de industria manufacturera, sin tener en cuenta la maquinaria y el equipo al que se destinen. Sin embargo, la fabricación de componentes y accesorios especiales mediante el moldeamiento o la extrusión de materiales plásticos se incluye en la clase 2520.
El reciclado de desperdicios también se considera una actividad de la industria manufacturera.
Observación: Los límites entre las actividades de las industrias manufactureras y las de otros sectores del sistema de clasificación pueden ser algo imprecisos. Por regla general, las unidades del sector de la industria manufacturera se dedican a la transformación de materiales en nuevos productos. El resultado de su actividad es un producto nuevo. Sin embargo, la definición de lo que constituye un producto nuevo puede ser hasta cierto punto subjetiva. A modo de aclaración, en la CIIU se clasifican como actividades de la industria manufacturera las siguientes actividades:
— Actividades de impresión y actividades conexas (véase 2221, 2222);
— Fabricación de mezclas preparadas para hormigón (véase 2695);
— Conservación de la madera (véase 2010);

2010 Aserrado y acepilladura de madera

División 20 Producción de madera y fabricación de productos de madera y corcho, excepto muebles; fabricación de artículos de paja y de materiales trenzables

201 2010 Aserrado y acepilladura de madera
202 Fabricación de productos de madera, corcho, paja y materiales trenzables
2021 Fabricación de hojas de madera para enchapado; fabricación de tableros contrachapados, tableros laminados, tableros de partículas y otros tableros y paneles
2022 Fabricación de partes y piezas de carpintería para edificios y construcciones
2023 Fabricación de recipientes de madera
2029 Fabricación de otros productos de madera; fabricación de artículos de corcho, paja y materiales trenzables

División 21 Fabricación de papel y de productos de papel

210 Fabricación de papel y de productos de papel
2101 Fabricación de pasta de madera, papel y cartón
2102 Fabricación de papel y cartón ondulado y de envases de papel y cartón

2109 Fabricación de otros artículos de papel y cartón

INDUSTRIA QUIMICA

En la industria química, la producción de un bien se lleva a cabo mediante la transformación química de las materias primas que intervienen en el proceso

Características de la Industria Química (Wittcoff-Reuben):

Crecimiento rápido
Elevado gasto en I&D
Competencia intensa
Intensa en capital
Economía de Escala
Rápida obsolescencia de equipos
Libertad de acceso al mercado
"Abundancia o escasez"
Comercio internacional
Fases críticas y penetración

ETAPAS DE PRODUCCIÓN EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

OPERACIONES Y PROCESOS

OPERACIONES

Definida como un proceso unitario de trabajo físico fundamental. Las operaciones unitarias corresponden por lo general a la preparación y/o acondicionamiento de material antes de una reacción (Mayer, V-I). Las operaciones más comunes son:

- Almacenaje	- Transporte
- trituración	- tamizado
- desempolvado	- mezclado
- disolución	- absorción
- filtración	- decantación
- centrifugación	- calentamiento
- refrigeración	- concentración
- desecación	- destilación
- sublimación	-

El almacenaje en la industria se aplica para sólidos, líquidos o gases. en el caso de sólidos, puede efectuarse al exterior (pilas) o en silos o bunker. Los líquidos se almacenan en tinas de madera (antiguo) o en depósitos metálicos sea en condiciones de frío o caliente; en el caso de combustibles, los depósitos se suelen enterrar. Las gases se almacenan en gasómetros.

El transporte de líquidos o gases (fluídos) se realizan con el empleo de tuberías y la regulación con válvulas; en el caso de sólidos pequeños se utiliza transporte neumático. Los equipos de impulsión de los fluídos son las compresoras y bombas.

La trituración permite obtener un tamaño de partícula que van des trozos de 30-40 cm hasta partículas de menos de 1 micra (p.e. harina). La partícula es más sólida cuanto más grande es el material a triturar; el nombre de quebrantar se utiliza para triturar hasta el tamaño de una avellana (Mayer V-I)

PROCESOS

Definida como un proceso unitario de trabajo químico fundamental

REACCIONES EN LOS PROCESOS

- Reacciones Químicas
  - Reacciones de oxidación
  - Reacciones de reducción
- Reacciones Térmicas
- Reacciones Enzimáticas

VARIABLES DE REACCIÓN

Variables Generales:

- Temperatura
- Tiempo
- Humedad (hidromódulo)
- Presión
- Flujo o caudal

Variables Específicas:

- Velocidad de reacción
- pH
- Concentración de Reactivos

INDUSTRIA QUÍMICA EN EL PERÚ

Industria textil
Industria alimentaria y agroindustria
Industria metalúrgica
Industria celulósica y papelera
Industria del cemento
Industria química azucarera (sucroquímica)

EQUIPOS DE LA INDUSTRIA QUÍMICA

EQUIPOS PARA PROCESOS

Reactores

EQUIPOS PARA OPERACIONES

BALANCE DE MATERIA Y DE ENERGÍA

Balance de Materia
Balance de Energía

II. LA MADERA

2.1 Conceptos Generales y Estructura

La madera, considerada como el principal producto del bosque, ha sido uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre. Distribuido en todo el mundo, se distinguen zonas de producción de madera en bosques de climas templados, tropicales y sub-tropicales. Dentro de cada zona o región se encuentran una gran variedad de especies propias del lugar, llegándose a distinguir dos grandes grupos : las maderas de especies de latifoliadas y las de coníferas. Al respecto, para distinguirlas dentro del reino vegetal, se propone la siguiente clasificación de las especies madereras dentro del reino vegetal, según Wilson y Loomis [1]:

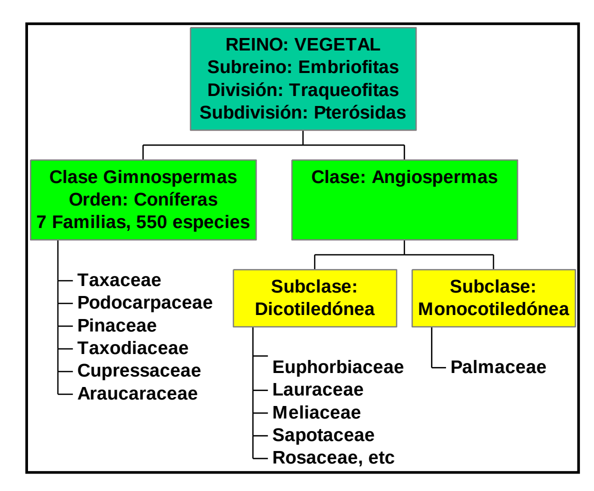


Figure 1.1: Clasificación de Especies Forestales en el Reino Vegetal

La clase gimnosperma es una de los grupos botánicas, con sistema vascular, más antigua y actualmente presentes sobre la tierra: comprende especies árbóreas y arbustivas, con un sistema vascular bien desarrollado. La clase comprende 4 ordenes botánicas (phylum)[2]:

- Coníferas (Coniferofitas), especies arbóreas;
- Cycadales (Cycadofitas), pequeñas palmeras; Cycas de Japón, Cyca revoluta
- Ginkgoales (Ginkgofitas), árboles de hojas bilobuladas; Ginkgo biloba
- Gnetales (Gnetafitas); Welwitschia mirabilis.

2.2 Estructura Macroscopica de la Madera

A pesar de haber mucha diferencias en su estructura entre las especies forestales, las partes macroscópicas son comunes en todos los árboles, cumpliendo en la práctica similares funciones. La definición de algunos conceptos generales de las partes macroscópicas del árbol son mencionados a continuación:

2.2.1 Cambium

Responsable del crecimiento del árbol en dirección radial; durante el período de crecimiento activo, que ocurre de primavera a verano en zonas templadas y casi todo el año en zonas tropicales, las células cambiales se multiplican dando lugar a nuevas células leñosas hacia la zona interna del tallo (xilema) y a células floemáticas hacia la zona externa (corteza). En resumen, se le considera el tejido responsable del crecimiento diametral del árbol, formando corteza hacia afuera y madera hacia adentro, ubicándose el cambium entre estas dos partes.

2.2.2 Corteza

Corresponde a la parte envolvente del árbol; se diferencian dos partes, la c. interna y la c. externa.

Corteza externa:

Denominado tambien súber o corcho; esta conformado por tejido de células muertas, aunque cumple una función de protección a la planta, ayudando a regular su balance hídrico. Generalmente presenta un aspecto quebradizo, siendo de mayor espesor en las coníferas.

Corteza interna:

Conocido como líber, esta formado por tejido de células vivas; cumple la función de distribución de los productos elaborados por las hojas, hacia el tallo. Presenta naturaleza fibrosa en la mayoria de especies latifoliadas; además en algunas familias se encuentra tubos o canales conductores, como es el caso de los tubos laticíferos, conductores del látex en las Euphorbiaceae.

2.2.3 Xilema

Corresponde a la parte de madera propiamente dicha; comprende dos zonas bien definidas: la albura y el duramen.

Albura:

Zona en la madera de color claro; presenta tejido fisiológicamente activo que cumple función de conducción o transporte de los nutrientes absorbidos por la raíz hacia las hojas. Además, en el resto de tejidos, parénquima y fibras, se acumulan sustancias de reserva a la vez de servir de sostén de la planta, respectivamente.

Duramen:

Zona mayormente de color oscuro, a comparación de la anterior. Corresponde inicialmente a una parte de la albura, modificada durante el crecimiento, por acumulación de varias sustancias que se depositan al interior de las células; estas sustancias se forman debido a que las unidades presentes sufren cambios químicos, formándose como metabolitos productos tales como resinas, taninos, gomas, compuestos fenólicos y sustancias cromógenas; estas nuevas sustancias suelen oscurecer la zona del duramen, o en cualquier zona donde se generen dentro de la madera.

2.3 Formacion De Productos En Las Plantas

2.3.1 Formacion De Azucares en Plantas

Tal como ya es conocido por los investigadores y la bibliografía respectiva, por el el mecanismo de la fotosíntesis se forman los siguientes productos:

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + 672\ Kcal \Rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_6$$

se forma como producto primario un monosacárido del tipo hexosa (fructosa o glucosa). El azúcar formado según la ecuación de fotosíntesis tiene dos destinos importantes: en el primero, parte del ázucar es utilizado para la obtención de energía para el proceso respiratorio de las diferentes partes del árbol; en el segundo destino, el azúcar no utilizado inmediatamente se emplean para formar otros carbohidratos o glúcidos, de mayor peso molecular o tambien para la formación de grasas, proteínas u otras substancias. Todas la reacciones posteriores, diferentes al de la fotosíntesis, no requieren luz solar, pero utilizan la energía química de los ATP (adenosin trifosfato) producto de la oxidación del azúcar. A partir de los azúcares simples, los carbohidratos más importantes que se forman son la sacarosa, almidón y celulosa. En algunas plantas, como la caña de azúcar y la remolacha azucarera, los carbohidratos se almacenan bajo la forma de sacarosa, aunque la principal forma de almacenamiento de glúcidos en las plantas es como almidón, polisacárido que se encuentra bajo una forma granular en la planta, actuando como una reserva energética. En el caso de la celulosa, de fórmula general igual al almidón $(C_6H_{10}O_5)_n$, no actúa como reserva alimenticia o energética de la planta sino más bien que cumple una función como material estructural en la planta.

Una fracción de los azúcares se emplea en la formación de las proteínas; estas se acumulan en las plantas como parte del protoplasma (células vivas) o como proteínas especializadas en zonas de almacenamiento, como por ejemplo semillas, hojas, tubérculos, rizomas, yemas, raíces, etc. Asimismo, tambien se forman lípidos, distribuídos por toda la planta (como gotas en el citoplasma); comúnmente los lípidos se denominan grasas (sólidas a temperatura ambiente) o aceites (con un punto de fusión menor). La formación de grasas es común en células animales y los aceites en vegetales; estos últimos son considerados fuentes primarias de energía y se almacenan principalmente en frutos y semillas, pero tambien se le encuentra en hojas y tallos.

2.3.2 Formacion Del Leño o Madera

Las sustancias nutritivas elaboradas fluyen hacia toda la planta a través del floema y es utilizado inmediatamente o luego de un período de almacenamiento para formar nuevos tejidos a partir de las células cambiales: se dividen formando las células leñosas, o xilemáticas, hacia adentro , y las células floemáticas hacia afuera.

2.3.2.1 Elementos Del Leño

Anatómicamente se encuentran los siguientes elementos en la madera:

- ***fibras***, son las células más abundantes, de forma fusiforme y pared celulósica; en la madera de especies latifoliadas rodean a los vasos y su dimensión varía de 1-2 mm. En general cumplen la función de estructura o soporte en el árbol (figura 1.2).
- ***traqueidas***, coresponde a la parte equivalente a las fibras en las especies coníferas, siendo el principal componente; su longitud va de 3 a 5 mm. Además de la función de soporte estructural, son conductores de savia.
- ***parénquima***, de disposición axial o radial. Son células de paredes delgadas y lumen amplio y cumplen una función como tejido de reserva energética o alimenticia en el árbol.
- ***vasos leñosos***, en disposición axial, cumplen función de conducción de savia en latifoliadas.
- ***canales gomíferos*** (en latifoliadas) o **canales resiníferos** (en coníferas); son conductos tubulares de longitud variable, formados por células epiteliales. Sirven de depósito de resina o goma secretadas por las células epiteliales.

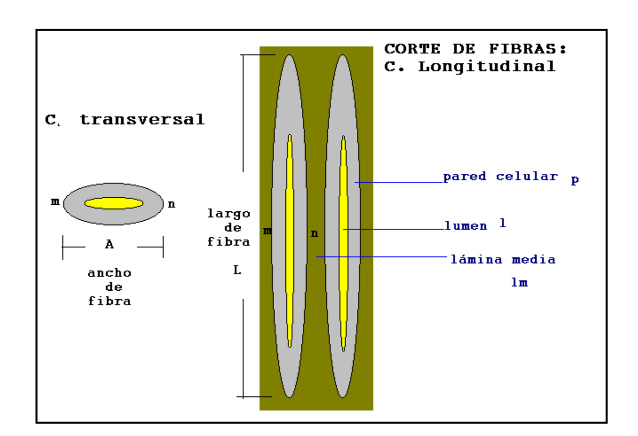


FIGURA 1.2: Características de las Fibras Vegetales

2.4 Composicion Quimica De La Madera

Britt ([3]) menciona que la química de la madera esta determinada principalmente por la química de sus componentes; pero las propiedades físico-químicas de estos componentes esta influenciada por la ubicación de estos componentes en la estructura de la madera, relacionada principalmente a la ramificación de los polímeros. Los componentes químicos de la madera se clasifican, cuantitativamente, de la siguiente manera:

2.4.1 Componentes Mayores

(a) Holocelulosa

Fracción de polisacáridos, corresponde a polímeros de largas cadenas de unidades de azúcares. Dentro de esta fracción se tiene a:

(a.1) Celulosa:

Es el principal polisacárido, se concentra en la pared de las fibras donde se presenta como una estructura cristalina; se compone de una de cadena de unidades de ß anhidro-glucopiranosa. Representa entre 40 a 50 por ciento de la fracción de masa seca en la madera.

(a.2) hemicelulosas:

Polisacáridos que por hidrólisis dan hexosas (D-glucosa, D-manosa, D-galactosa) y pentosas (D-xilosa y L-arabinosa); existe una fracción ácida denominada ácidos urónicos o a. metoxi-urónicos. Representa entre 15 a 25 por ciento.

(b) Lignina

Es una sustancia amorfa; se presenta como un polímero tridimensional y tiene una fracción aromática, además de grupos metoxilos y grupos alifáticos e hidroxifenólicos. Es denominado el material incrustante o cementante entre las fibras. Representa entre 20 a 30 por ciento.

2.4.2 Componentes Menores

(a) Extractivos

Son las sustancias extrañas, diferentes a las antes mencionadas; son el resultado de los diferentes procesos metabólicos celulares; representa del 1 al 10 por ciento. Los principales extractivos de origen forestal son los siguientes:

- compuestos terpénicos y terpenoides: aceites esenciales, ácidos resínicos, etc;
- compuestos fenólicos, las moléculas contienen grupos fenólicos, se presentan como glicósidos, combinado con azúcares. Se incluyen en este grupo ácidos de bajo PM, lignanos, estilbenos, flavonoides y taninos.
- otros carbohidratos como las sustancias pécticas, almidón, oligosacáridos, tambien ceras, grasas, etc.

(b) Constituyentes inorgánicos

Es la fracción mineral que aparece en las cenizas; en coníferas varia de 0,2 a 1 por ciento y en latifoliadas puede llegar hasta 5 por ciento. Los cationes más importantes son de potasio, calcio y magnesio; se puede presentar en la planta como sales orgánicas. La fracción aniónica puede ser carbonatos, sulfatos, fosfatos y silicatos.

2.5 La Celulosa

Es un holósido polisacárido (homopolisacárido) conformado por **n** unidades de D-anhidro-glucopiranosa ligadas por enlaces del tipo ß,1-4. Es el material estructural de la planta y quizá el más abundante en el reino vegetal; representa en la madera alrededor del 50 por ciento de la masa seca, en las hojas se encuentra en una cantidad menor al 10 por ciento y en el algodón el 98 por ciento. Su nomenclatura, trivial, hace recordar que la **celulosa** es el principal componente de la pared de la **celula**. La celulosa es considerado un polisacárido simple por su estructura lineal y porque solo presenta un solo tipo de enlace glicosídico. Se presenta como un polímero de alto peso molecular; en estado nativo puede llegar a un grado de polimerización de 10000 u. (PM = 162 000). Dentro de las principales características se menciona:

- es un material abundante, fácil de cosechar y de un costo relativamente bajo;

- ofrece una gran resistencia debido a la forma fibrosa en que se presenta y a su estructura cristalina; esto le da una gran resistencia a la tensión;
- es insoluble en agua y en muchos otros solventes, pero se solubiliza en el reactivo de Schweizer (sol. de hidróxido de cobre amoniacal);
- es intrínsicamente blanco;
- tiene una gran afinidad por el agua, líquido que influye en sus propiedades mecánicas como madera y, en las uniones fibra fibra cuando se hace una mezcla de ellas (en la formación del papel);
- se hidroliza por la acción de acidos fuertes. La hidrólisis completa da como producto principal a la glucosa; en condiciones menos enérgicas se forman la celobiosa, celotriosa y celotetrosa.

2.5.1 Propiedades De La Celulosa

2.5.1.1 Hinchamiento

Es la capacidad que tienen la celulosa , y por ende las fibras, de aumentar sus dimensiones (ancho y longitud) por diversas reacciones o propiedades físico - químicas de las fibras. Puede manifestarse de dos formas: intercristalino e intracristalino. El hinchamiento intercristalino se relaciona con la capacidad de tomar agua dentro de su estructura, relacionado con las propiedades físicas de adsorción y desorción.

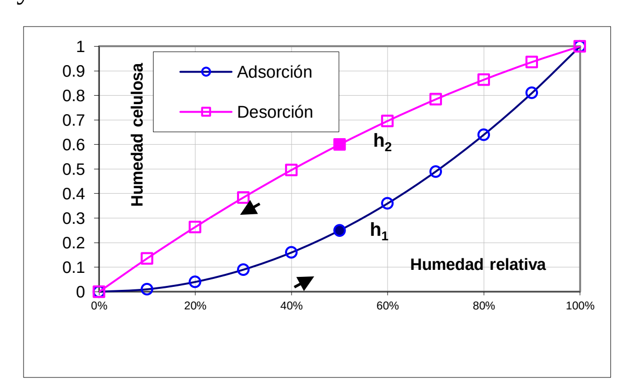


FIGURA 1.3: Curvas Adsorción / Desorción en la Celulosa

Histéresis

La cantidad de agua mantenida por la celulosa no solo depende de la humedad de equilibrio sino tambien de la dirección en que se manifiesta el equilibrio, es decir si es adsorción o desorción. Stamm (   ) cita a varios autores, diciendo que, la cantidad de agua adsorbida desde la condición seca es siempre menor que la cantidad retenida en desorción, para el mismo valor de presión de vapor; la explicación probable para algunos es que la presencia de aire en la celulosa es responsable de la histeresis; agregan que durante la adsorción se forma un gel, como una solución sólida (reemplazo de una interfase sólida-sólida por otra sólida-líquida-sólida).

En las curvas respectivas, los valores de humedad para la curva de adsorción (h_1) son menores que los correspondientes a la curva de desorción (h_2); ver figura 1.3.

La relación de ambos valores h_1/h_2 es lo que se denomina tasa de adsorción/desorción (TAD). Un valor bajo de TAD indica una mayor variación o diferencia entre h_1 y h_2, pudiendo ser muy influenciado por el grado cristalino de la celulosa. Algunos valores de TAD son mostrados en la figura 1.4. Al punto de convergencia superior de las curvas adsorción y desorción se le denomina punto de saturación de las fibras; los investigadores en física de la madera asocian este valor con el punto máximo de humedad donde se alcanza el máximo valor porcentual de hinchamiento o expansión; en promedio se estima que este valor promedio es del 30 por ciento (base seca).

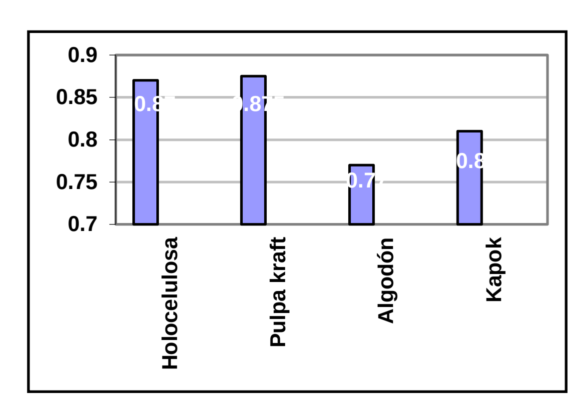


FIGURA 1.4: Valores TAD de Materiales Celulósicos

2.5.1.2 Reacciones Quimicas De La Celulosa

2.5.1.2.1 Reacciones Alcalinas

Se efectúa con soluciones alcalinas, a temperaturas altas (140 a 180°C) y con presencia de aire (o baja concentración de oxígeno); como resultado del mismo se produce inicialmente la rotura de la cadena celulósica, por sus grupos terminales, hasta llegar a una estabilización; hay una introducción de grupos carboxilos. Bajo las condiciones alcalinas , se presentan dos tipos de reacciones:

"Peladura" o "Peeling"

Corresponde a la reacción de degradación que se inicia por un extremo de la cadena o monómero terminal de anhidroglucopiranosa; el monómero se desprende del resto de la cadena, con la consiguiente reducción del grado de polimerización. Al final, en

la glucosa desprendida se introduce un grupo carboxilo, denominándose al producto final ácido glucoisosacarínico.

"Oclusión", "Detención" o "Stopping"

Es la reacción contraria a la anterior; se forma como producto final el ácido metasacarínico, que es estable en el medio alcalino de la reacción; por consiguiente se detiene la reacción de degradación de la celulosa.

2.5.1.2.2 Degradacion Hidrolitica

Tambien denominada degradación ácida, se lleva a cabo por acción del ión hidronio $\mathbf{H^+}$; este tipo de degradación se manifiesta de dos formas:

Hidrólisis heterogénea

Se presenta por acción de los ácidos débiles (ejm. ácido acético o a. fórmico); se lleva a cabo en dos etapas, iniciándose en los extremos de la cadena y se estabiliza hasta llegar a un GP de 200-300; sin embargo la celulosa mantiene su estructura fibrosa. Como producto final se obtiene la "hidrocelulosa" con característica de gel.

Hidrólisis homogénea

Por acción de los ácidos fuertes (ácidos clorhídrico o a. sulfúrico), se lleva a cabo en una sola etapa uniforme y el producto final es la D-glucosa. Los ácidos pueden actuar en forma concentrada o diluída. Las reacciones homogéneas ocurren de acuerdo a la siguiente ecuación de primer orden:

$$\frac{dX}{dt} = K(x_0 - x)$$

donde : x , cantidad de materia que reacciona
x_0, cantidad inicial de materia
K ,constante de velocidad de reacción
t , tiempo de reacción

2.5.1.2.3 Degradacion Oxidante

Se lleva a cabo por acción de reactivos oxidantes como son el ácido peryódico, dióxido de nitrógeno, dióxido de cloro, oxígeno (en medio alcalino). Esta reacción se presenta en los puntos reaccionantes de la celulosa (OH y CH_2OH), introduciéndose los siguientes grupos carbonilo (C=O) y carboxilo (COOH). El producto de la degradación oxidante es denominado oxicelulosa.

2.5.1.2.4 Degradacion Termica

Tambien denominada pirólisis, se puede establecer dos niveles de degradación térmica:

a menos de 200°C

Es gradual la reacción, hay envejecimiento acelerado , con formación de oxicelulosa.

mayor a 200°C

La reacción es completa con oxígeno, con formación de gases y agua.

La celulosa se degrada completamente por efecto térmico entre los 325 a 375 °C. Por encima de los 300 °C hay una rápida ruptura de las uniones glucosídicas, produciendo 1,6 - anhidro - ß - D - glucopiranosa y otros productos. Por pirólisis de la celulosa, a 600 °C, se forman diferentes productos, según estudio cromatográfico (Shafizadeh y Chin); cuadro 1.2.

CUADRO 1.2: Productos de Descomposición Térmica de la Celulosa

PRODUCTO	%
acetaldehído	1,5
furano	0,7
metanol	1,1
2,3 butanodiona	2,0
1-hidroxi-2-propanona	2,8
ácido acético	1,0
2-furaldehído	1,3
dióxido de carbono	6,0
agua	11,0
carbón	5,0
alquitrán	66,0

2.5.1.2.5 Degradacion Enzimatica

Las actividades metabólicas de ciertos seres vivos parásitos en la madera u otro material celulósico implican su degradación; un ataque selectivo sobre la celulosa causa en la madera la enfermedad denominada "*pudrición negra*", donde todos los polisacáridos son practicamente destruidos por un mecanismo selectivo, dejando inalterada a la lignina. El agente activo de la degradación celulósica es la enzima **celulasa**, segregada por la actividad biológica de los microorganismos, cuya presencia favorece las reacciones de hidrólisis. La degradación enzimática se origina en microorganismos como:
-hongos (atacan toda la fibra), p.e. basidiomicetos
-bacterias (ataca superficialmente a la fibra)
-microflora de los rumiantes

En términos generales, la degradación enzimática siempre ha sido considerada negativa; sin embargo, el desarrollo de la biotecnología ha permitido que, en la actualidad, se obtengan ventajas económicas como es el proceso enzimático con *Trichoderma viride*. Los principales factores que afectan la degradación enzimática son los siguientes:
- grado cristalino de la celulosa (influencia negativa)
- presencia de lignina (i. negativa)
- cantidad y calidad de extractivos (i. negativa)
- humedad (i. positiva)
- temperatura (i. positiva)

2.5.1.3 Propiedades Fisicas De La Celulosa

2.5.1.3.1 Densidad y Peso Especifico

El valor del peso específico de la celulosa es variable, de acuerdo al método utilizado para evaluar el volumen; en sustancia de madera, como fluidos de desplazamiento se utiliza el agua, alcohol etílico, glicerina, benceno, disulfuro de carbono, etc., siendo los valores de peso específico variables entre 1,460 a 1,548 (a 25°C) Algunos resultados de volumen y peso específicos, evaluados en diferentes productos, son mostrados en el cuadro 1.3.

CUADRO 1.3: Volumen y Peso Específicos de 3 Tipos de Celulosa

	volumen específico*	peso específico
celulosa madera	0,651	1,536
celulosa algodón	0,637	1,570
rayón viscosa	0,619	1,616

* es el valor inverso del peso epecífico; fuente : Stamm [4]

2.5.1.3.2 Capacidad Calorica

El calor de combustión promedio, a 25°C, es de 4143 cal/g , en análisis hecho sobre papel de filtro que tiene mas de 90 % de celulosa en su composición; evaluado como carbón, a 400°C, el calor de combustión fue de 7052 cal/g (Stamm). El calor específico, en la celulosa, varía con la temperatura y con el grado de humedad; con relación a este último valor, para un calculo real, se debe considerar el calor que se requiere para elevar la temperatura de la masa de agua que mantiene la celulosa. En análisis sobre base seca, Stamm encontró los siguientes valores :

Temperatura °C	Calor específico calorías /g.°C
0 - 80	0,347 (promedio)
20	0,346
25	0,366

El mismo autor propone la siguiente ecuación para hallar el calor específico de la madera en función de la temperatura (t en °C):

Calor específico (Cal/g.°C) = 0,266 + 0,00116t

Respecto al calor de reacción, al tratar la celulosa con diversos reactivos, en medio acuoso, este valor varia entre 16 a 20 cal/g .

2.5.1.3.3 Conductividad Termica

Esta propiedad definida como la habilidad del material para conducir calor debido a un efecto de las interacciones moleculares; este valor esta muy ligado a la naturaleza química del material, dimensiones físicas y estructura. El valor de la conductividad térmica **k** indica la cantidad de calor **Q** que atraviesa un cuerpo, por unidad de espesor **e** , por unidad de área transversal **A** , por unidad de tiempo entre dos lados **T** y por unidad de temperatura **t** .

$$k = \frac{Q * e}{A * T * t}$$

Algunos valores promedios de **k** son mostrados en el cuadro 1.4 para diferentes materiales:

CUADRO 1.4: Valores de Conductividad Térmica de Diferentes Materiales

MATERIAL	k	
	BTU-pulg / pie²-h-°F	W/m-°C
Aire	0,16	0,0023
algodón *	0,25	0,0361
tablero de corcho	0,30	0,0433
madera (grano ⊥) (grano //)	0,65 - 1,15 1,60 - 2,90	0,0930-0,1660 0,2310-0,4180
Ladrillo	4,80	0,6923
Acero	315	45,43
cobre	2700	389,4

* fibra con 95 % de celulosa. Fuente : Stamm [2]

2.5.1.3.4 Superficie Interna

Corresponde a la superficie microscópica, libre o capilar, de las fibras celulósicas; se determina en forma teórica o por medición microscópica, calculando el área superficial de 1 g de fibras celulósicas. Tambien existen otros métodos indirectos para su determinación como son adsorción de ácido esteárico, de nitrógeno, de butano, permeabilidad al aire, al benceno o al agua. Los valores estimados según el método para algunos materiales celulósicos son mostrados en el cuadro 1.5.

CUADRO 1.5: Superficie Interna de Diferentes Tipos de Fibras

Método	Material	Superficie Interna (m²/g)
Teórico	madera conífera (Db=0,4)	0,20
	pulpa química sin refinar	0,49
Microscopía	algodón	0,27
Adsorción N_2	celulosa	1,00
	algodón sin refinar	0,60
	algodón refinado	1,60

2.6 Hemicelulosas

Definicion

Descritas por Schulze, en 1891, en la madera corresponde al conjunto de holósidos insolubles o parcialmente solubles en agua, pero fácilmente atacados por ácidos minerales y álcalis diluídos. Los nombres respectivos de estos holósidos fueron xilanos, arabanos, pentosanos o galactanos, según fuera la naturaleza del azúcar que den en cada caso por hidrólisis; tambien se incluyen a los ácidos poliurónicos que, luego de una reacción hidrolítica, se desdoblan en el ácido galactourónico y el glucorónico. Las características generales de las hemicelulosas son:

(i) polímeros lineales y/o con una gran cantidad de ramificaciones

(ii) presentan estructura no cristalina o amorfa

(iii) su grado de polimerización varía de 100-200

2.6.1 Ubicacion de las Hemicelulosas

Aunque existen muchas teorías sobre su correcta posición en la planta, predomina aquella que dice que las hemicelulosas se encontrarian formando una matriz asociada a la lignina, en la lámina media; sin embargo al separar las fibras, el polímero es degradado, con una reducción significativa de su peso molecular, comparadado con su verdadero valor en madera. La cantidad de hemicelulosas en la madera (bms) varía entre 20 a 30 por ciento. Estructuralmente existen diferencias entre las hemicelulosas de especies coníferas con las de latifoliadas; asimismo, tambien se encuentran diferencias muy marcadas entre las hemicelulosas de ramas, raíces, corteza y madera.

2.6.2 Composicion de las Hemicelulosas

Las principales unidades de monómeros de azúcares que componen las hemicelulosas son las siguientes:

Pentosas, de 5 carbonos: D-xilosa (xilopiranosa); L-arabinosa (arabinofuranosa)

Hexosas, de 6 carbonos: D-manosa (manopiranosa); D-glucosa (glucopiranosa); D-galactosa (galactopiranosa); ácido D-galactourónico (ac. glucopiranosilurónico).

2.6.4 Propiedades Fisicas

2.6.4.1 Adsorcion De Agua

Aparentemente la estructura ramificada o amorfa de las hemicelulosas favorece la adsorción de agua; al respecto, Stamm encuentra valores de humedad en equilibrio a diferentes valores relativos de presión de vapor (humedad relativa), para las hemicelulosas de Eucalyptus, obtenidas de dos formas; la variación de estos valores se muestran en la siguiente figura 1.6.

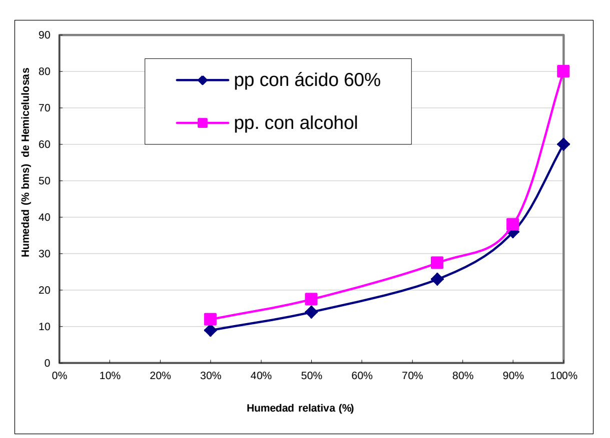


FIGURA 1.6: Humedad de Equilibrio de Hemicelulosas

2.6.4.2 Propiedades Quimicas

2.6.4.2.1 Descomposicion Termica

Las reacciones y forma de degradación térmica son similares a las ocurridas con celulosa; sin embargo una diferencia importante con la celulosa es la velocidad de descomposición. Al respecto Stamm menciona los siguientes valores de descomposición y formación de productos por efecto de temperatura a 220°C sobre la descomposición de estos dos carbohidratos:

CUADRO 1.6: Descomposición de Carbohidratos

	Productos			% pérdida
	tiempo	CO_2	H_2O	
α celulosa	16 h	13,9	1,4	11,8
hemicelulosas	2 h	23,7	7,4	14,1

fuente : Stamm [2]

Se observa siempre, bajo condiciones de presión atmosférica, una rápida degradación térmica en las hemicelulosas con una tasa de 11,85 u. por hora comparado con la alfa celulosa cuya tasa de descomposición es 0,87 u./hora. Según Shafizadeh y Chin (1977) la degradación térmica de los xilanos ocurren con poca energía, siendo endotérmica en los 120 y 250°C y exotérmica en los demás valores, entre 50 a 300°C; los productos de pirólisis al último valor de temperatura rinden aproximadamente 16 por ciento de alquitrán, conteniendo dentro una mezcla de 17 por ciento de oligosacáridos.

2.6.4.2.2 Hidrolisis

La hidrólisis de las hemicelulosas se efectúa en medio ácido, siendo la tasa de descomposición similar a la que ocurre en la celulosa. Se utilizan ácidos minerales (a. clorhídrico y a. sulfúrico) para la hidrólisis. Debido a la estructura amorfa, las hemicelulosas son fácilmente hidrolizadas, dando como resultado diferentes azúcares, los más

importantes se mencionan en el cuadro 1.7.

CUADRO 1.7: Constantes de Hidrólisis de Monosacáridos

Tipo de Azúcar	constante de hidrólisis	tiempo medio de estabilidad
	min^{-1}	minutos
D-glucosa	0,0242	28,6
D-galactosa	0,0263	26,4
D-manosa	0,0358	19,4
D-arabinosa	0,0421	16,4
D-xilosa	0,0721	9,6

Se observa que la glucosa es el azúcar más estable, con una mayor tiempo medio de permanencia luego de la hidrólisis, siendo el menor la xilosa; se deduce que las hemicelulosas con mayor composición en xilosas (xilanos) sufren una rápida descomposición por efecto del ácido; en sentido inverso estarían los mananos, glucomananos y/o los galactoglucomananos, dependiendo de la proporción en que se presenten cada uno de los monómeros. Sin embargo, se considera que hay una influencia aparente de la velocidad de difusión del ácido dentro de la estructura del azúcar; esto podría explicar la estabilidad de las fracciones de hemicelulosas presentes en un material conformado básicamente por diferentes carbohidratos (madera, papel, etc.). La hidrólisis ácida de los xilanos rinde aproximadamente 54 por ciento de xilosas (Shafizadeh y Chin).

2.6.5 Diferencias De Las Hemicelulosas Con Otros Polisacaridos De Las Plantas

En muchos casos se menciona que las hemicelulosas presenta una estructura química compleja lo que la confunde con otros polisacáridos presentes en las plantas; con la celulosa es más visible apreciar las diferencias pero no sucede lo mismo cuando se compara con las pectinas y gomas. A continuación se hace una breve comparación con los polímeros mencionados:

A) Con la Celulosa

Las hemicelulosas, estructuralmente, se diferencian de la celulosa, por la mayor ramificación de la primera y además por tener un menor grado de polimerización y por tanto un peso molecular muy bajo. Además las hemicelulosas son heteropolisacáridos, encontrandose en su estructura hexosas y/o pentosas; en cambio la celulosa es un homopolisacárido, conformado sólo por un tipo de hexosa.

B) Con las Pectinas

Las pectinas son polímeros de ácido galactourónico, unidos por enlaces □-1,4 glicosídicos, presentando además 2/3 de los grupos carboxílicos esterificados con metanol. Se encuentran en las paredes de las células vegetales, especialmente en raíces y frutas (p.e. manzanas y peras); se le utiliza como gelatificantes.

C) Con las gomas naturales

Corresponde a polímeros de carbohidratos que se disuelven o se hinchan fácilmente en agua, siendo de un caracter netamente hidrofílico. El polímero tiene cadenas lineales y ramificadas, con diferencias según el origen de la goma; su peso molecular varía de 200 a 300 mil (GP de 1500 u.). Como ejemplos de gomas, se tiene a la goma arábiga (género *Acacia*), su componente principal es la unidad de D-galactopiranosa, encontrándose tambien ácido D-glucorónico, L-arabanofuranosa y L-ramnopiranosa.

2.6.6 Diferencias De Las Hemicelulosas Entre Coniferas y De Latifoliadas

Al comparar entre las hemicelulosas de los dos grupos de especies forestales se encuentra que, en las maderas de latifoliadas predominan los xilanos, parcialmente acetilados, con menores cantidades de glucomananos; en cambio en las coníferas predominan los galactoglucomananos parcialmente acetilados, con menores cantidades de arabinoglucoronoxilano. Dentro delas coníferas, destacan especialmente el género Larix (alerce), en cuya composición predominan los arabinogalactanos

Glucoronoxilanos

Tambien conocidas como xilanas, predominan en las latifoliadas; presenta una cadena lineal de unidades anhidro-ß-D xilopiranosa,presentando grupos acetilos. En coníferas se presentan como arabino - glucorono - xilanos, sin grupos acetilos.

Galactoglucomananos

Es el componente principal en hemicelulosas de coníferas; es soluble en agua y contiene galactosa, glucosa y manosa; cuadro 1.8.

CUADRO 1.8: Tipos De Hemicelulosas y Caracteristicas

Tipo	Cantidad % bms	Solubilidad	GP
Coníferas			
Galacto-glucomanano I	5 - 8	al,ag*	100
Galacto-glucomanano II	10-15	bo,al	100
Arabino-glucoronoxilano	7 -10	al, ag*	100
Arabinogalactano [1]	5 -35	ag	200
Latifoliadas			
Glucoronoxilano	15-30	al	200
Glucomanano	2-5	bo,al	200

* parcialmente soluble; al en álcali; ag en agua; bo en borato
[1] alerce (género *Larix*)

2.7 Lignina

Es el segundo componente en importancia dentro de la madera, luego de la celulosa. Su presencia le da el caracter leñoso a una especie forestal y su contenido va aumentando con la edad de la planta. Aparentemente cumple una función de cohesión entre las fibras, por lo que, en ciertos casos, debe ser eliminada (solubilizada) al obtener pulpas celulósicas. Pero sus propiedades físicas y su estructura química le da características especiales a ciertos productos como son su propiedad termoplástica que favorece la consolidación de un tablero de fibras ("fiberboard") o tambien por su relación con el rendimiento y el poder calórico que aporta en el carbón vegetal. Asimismo, el desarrollo de la tecnología actual ha permitido estimar un potencial amplio de uso de la lignina como fuente de diversos productos químicos, tales como plásticos, resinas fenólicas, aditivos químicos, etc. cuya producción y demanda se vería favorecida por las nuevas tendencias de consumo en la actualidad.

2.7.1. Definicion

Se define a la lignina como el material incrustante de la planta que da cohesión y rigidez a las fibras; químicamente esta conformada fenilpropano, como unidad básica, unidas por diferentes tipos de enlace, llevando dentro de estructura grupos metoxilos, además de los grupos hidroxilos, propios de los fenoles.

2.7.2. Funciones y Distribucion

Como principal función de la lignina se menciona la de actuar como refuerzo mecánico en el leño, siendo su formación exclusiva en plantas vasculares con tejidos especializados. Durante el crecimiento de la planta, los espacios vacíos son llenados por la lignina, con el doble propósito de cementar y asegurar las fibras juntas, a la vez que la endurece y protege de ataques físicos y químicos, dándole rigidez al tejido leñoso; asimismo, por sus características, tambien le da resistencia a la compresión ya que el árbol es sometido a un esfuerzo constante debido al peso del mismo y a la influencia de fuerzas externas. La lignina aparece concentrada y compacta en la lámina media, pero más dispersa y porosa en la pared de la fibra, encerrando una matriz en la cual se incluyen las fibrillas elementales de celulosa. En maderas de latifoliadas, más de las 2/3 partes de la lignina presente se ubican entre la lámina media y la pared primaria de la fibra; la lignina aislada de esta zona presenta una estructura densa y membranosa; en cambio en la pared secundaria, la lignina es microporosa y junto con las hemicelulosas forman una fase amorfa en el cuál las microfibrillas estan inclusas. El promedio de lignina es algo menos de 30 % en coníferas y alrededor de 20 a 25 % en latifoliadas, aunque las diferencias para una misma especie se dan por la calidad de sitio y esta en relación directa con la edad del árbol.

2.7.3. Estructura y Formacion de la Lignina

En las definiciones clásicas se menciona que la lignina esta formada por unidades de fenil-propano y lleva la mayor parte del contenido de metoxilos de la madera, además de los grupos OH que le dan el caracter fenólico._Según Glasser[5] la estructura de la lignina evaluada en cada caso se juzgará en la medida que se aproxime a un modelo ideal. Por tal razón, los modelos estructurales ideales se basan en la teoría de la deshidrogenación de los alcoholes para-hidroxi-cinamílicos. La lignina se forma por acción de una enzima catalizadora, en una reacción de polimerización deshidrogenativa a partir de 3 precursores básicos:

- alcohol coniferílico (guayacol o coniferina)
- alcohol sinapilico (siringina)
- alcohol p-coumarilo

La lignina de las maderas de coníferas estan formadas por un 85 a 90 % de unidades aromáticas de guayacol, en cambio en las latifoliadas se dividen por igual guayacol y siringina. Rydholm[6] agrega que la coniferina y la siringina , aparecen en la savia del cambium, y se difunden en la madera pero tambien se forman en las células lignificadas.

2.7.4 Propiedades De La Lignina

2.7.4.1 Propiedades Fisicas

Las más importantes son las siguientes:

- es un polímero tridimensional con grado de polimerización promedio de 60 y peso molecular entre de 500 hasta 20000, dependiendo del método utilizado para su aislamiento;
- es insoluble en agua, pero soluble en álcali debido a su contenido de grupos fenólicos, aunque su compacta ubicación en la pared de la fibra y posible unión química a los carbohidratos la hace insoluble al álcali *in situ*;
- la difracción de rayos X demuestra su estructura no cristalina, aunque tal vez puede tener orientación en la lámina media;
- es muy reactiva en fase sólida;
- presenta propiedades de absorción para reactivos químicos y gases, con una superficie promedio de 180 m^2/g;
- en estado amorfo no tiene punto de fusión, pero desarrolla un poder de adhesión sobre temperaturas de 70 °C a 110 °C;
- se comporta como un compuesto termoplástico de bajo grado, pudiendo ser suavizada por el calor. Su

condición viscoelástica se asocia con el movimiento rotacional de segmentos de polímeros los que son activados por el calor; el potencial de plastificación de la lignina en agua se relaciona con los grupos hidroxilos y otros grupos polares;

- tiene capacidad de absorber luz ultravioleta en un rango de 12,5 a 14 L/g-cm , a 2800 °A. La intensidad de absorción puede determinar su concentración.

2.7.4.2 Propiedades Quimicas

2.7.4.2.1 Reacciones Quimicas

i) Con de grupos funcionales;
De los grupos hidroxilos, reacciones de esterificación y eterificación;
De los grupos metoxilos con ácido yodidríco, a. sulfúrico, álcalis y sulfuro de sodio;

ii) Oxidación, con álcalis y otros, produciendo derivados fenólicos;

iii) hidrólisis, la lignina es resistente a los ácidos fuertes diluídos, pero estas reacciones se pueden efectuar en solventes como las mezcla de alcohol con ácidos minerales (alcoholisis);

iv) sulfonación, con una solución acuosa de una sal de bisulfito y ácido sulfuroso;

v) hidrogenólisis, esta última es hidrogenación más hidrólisis. Se rompen enlaces de cadenas laterales, saturación de cadenas alifáticas y de núcleos aromáticos;

vi) halogenación, la lignina con el cloro dan reacciones de sustitución y con H adición de dobles enlaces C=C y oxidación;

vii) nitración, implica hidrólisis y oxidación, además de sustitución.

2.7.4.2.2 Pirolisis Y Propiedades Termicas

La pirólisis de la lignina ha sido poco estudiada; se sabe que el grado de descomposición ocurre entre los 250 a 500 °C, siendo alta entre 310 a 420 °C. Pero debido a su compleja estructura química, el mecanismo de descomposición es poco comprendido (Shafizadeh y Chin, 1977). Estos autores reportan diversos productos por pirólisis de la lignina, a 450-500 °C; cuadro 1.9.

CUADRO 1.9: Productos de la Pirólisis de la Lignina

Fracción	Productos	Rendimiento
Volatil	CO_2, metano, CO, etano	10 %
Líquida	agua, metanol, acetona, Ac. acético	20 %
Alquitrán	compuestos fenolicos	15 %
Carbón	residuo carbonáceo	55 %

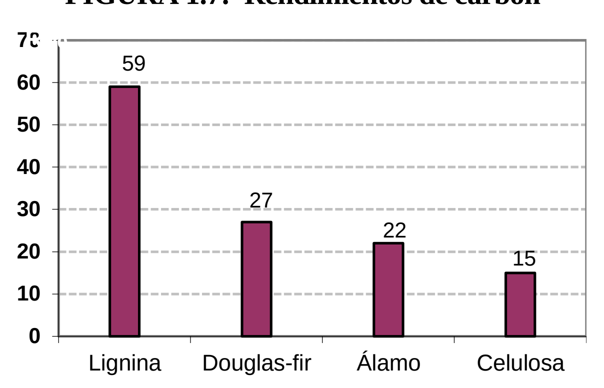
En latifoliadas, el rendimiento de metanol (2%) es el doble que en coníferas, debido a la mayora cantidad de grupos metoxilos de la siringina comparada con el guayacol.

CUADRO 1.10: Características de Diferentes Tipos de Carbón

Materia Prima	Calor Combustión (kcal/kg)
Carbón de lignina	7416
Carbón de madera conífera (Douglas-fir)	7259
Carbón de madera latifoliada (álamo)	7124
Carbón de celulosa	7052
Lignina (Klason)	6371
Madera conífera	5156
Madera latifoliada	4618
Celulosa (papel filtro)	4143

R: rendimiento. Carbón obtenido a 400°C por 10 minutos
fuente: Shafizadeh y Chin , 1977.

FIGURA 1.7: Rendimientos de carbón



De las propiedades térmicas de la lignina, la más importante es el calor de combustión, que medido a 25 °C, es superior comparado con la celulosa. El calor liberado es mayor cuando proviene del carbón de lignina, tal como se muestra en el cuadro anterior.

Aparentemente, el contenido de carbono original y los tipos de enlaces favorecen los valores de calor de combustión en la lignina. En la práctica se ha demostrado esta teoría, donde especies forestales con alto valor de lignina presenta un mayor valor de poder calorífico superior; además a partir de las maderas con alto valor de lignina siempre se obtiene un rendimiento elevado, al obtenerse carbón vegetal.

2.8 Extractivos

Tambien denominadas por algunos autores como los componentes menores o las sustancias extrañas del árbol; estan siempre presentes e involucradas en el crecimiento de las células del árbol y corresponden a un producto metabólico. Estos compuestos extraños

pueden ser de composición simple, bajo peso molecular y completamente solubles en agua o solventes orgánicos; en cambio; otros más complejos son poco o parcialmente solubles en diferentes solventes. Los extractivos cumplirían una función no determinada en el árbol, aunque prevalece el criterio de que actuan en alguna actividad fisiológica durante su crecimiento, como atrayente para la polinización, cicatrizante de heridas en las plantas, reserva energética, etc.; en la madera, influyen sobre su color, olor, la resistencia al ataque biológico, facilidad de tranformación química ,etc. La composición química y cantidad de los extractivos varía ampliamente entre coníferas y latifoliadas, entre familias, entre géneros y entre especies, y aún dentro de una especie varía por edad, tipo de suelo, posición en el árbol, entre albura y duramen; por la mayor evolución de las latifoliadas, hay mayor diferenciación de extractivos , comparadas con las coníferas.

Extractivos de Coníferas

En este caso se presentan en la madera canales resiníferos en dirección longitudinal (vertical) y radial (horizontal). La resina (oleorresina) es generada por una actividad biológica de las células epiteliales que rodean el canal; al provocar una herida en la albura (donde hay presión alta) fluye rápidamente el extractivo hacia el exterior. Se considera que más del 95 por ciento de los extractivos de coníferas provienen del parénquima (Sjostrom); su composición principal es de grasas y terpenos. A la muerte de las células, ocurren cambios químicos generando una gran cantidad de extractivos que se acumulan en el duramen .

Extractivos de Latifoliadas

En este caso, los extractivos se generan en las células de parénquima conectadas con los vasos; estos productos son ricos en componentes alifáticos, las oleorresinas en terpenoides y tambien en compuestos fenólicos que se acumulan preferentemente en el duramen.

2.8.1 Quimica De Los Extractivos

En la clasificación general, la mayoría de los extractivos mencionados presentan una composición química heterogénea y compleja; sin embargo en cada caso generalmente existe una sustancia denominado **componente activo**, que casi siempre se presenta en mayor cantidad dentro del extractivo y además sirve para identificarlo.

1.8.1.1 Clasificacion Quimica

Los extractivos se agrupan, según su constitución química, en tres grandes grupos (Sjostrom-1981 y Quinde-1984): (1) compuestos alifáticos; (2) terpenos y terpenoides; (3) compuestos fenólicos

1.8.1.1.1 Compuestos Alifaticos

Corresponde a los compuestos de cadena abierta o acíclicos; los de origen forestal incluyen ácidos grasos, grasas, ceras, alcanos, alcoholes, etc. Los ácidos grasos se les encuentra como ésteres y forman las grasas, con glicerol; en cambio, con alcoholes alifáticos de alto peso (C_{18} a C_{30}) forman las ceras. Los ácidos más representativos son el linoléico, oléico y linolénico, aunque en general su presencia en madera es mínima comparada con los demás extractivos (terpenos y compuestos fenólicos) y por tanto no tienen mayor importancia económica.

1.8.1.1.2. Terpenos Y Terpenoides

Según la definición de Peter (1973) los terpenos corresponde a los hidrocarburos alicíclicos no saturados (cíclicos en su estructura pero de propiedades alifáticas); estos extractivos se caracterizan por estar formadas por moléculas de isopreno (2-metil butadieno). Son de origen vegetal y se les encuentra preferentemente en los aceites esenciales de flores, hojas, frutos o raíces de las plantas. En forma general, se pueden encontrar dos grupos principales dentro de los terpenos:

(a) Terpenos verdaderos

De fórmula $(C_5H_8)_n$
monoterpenos $(C_5H_8)_2 = C_{10}H_{16}$
sesquiterpenos $(C_5H_8)_3 = C_{15}H_{24}$
diterpenos $(C_5H_8)_4 = C_{20}H_{32}$
politerpenos $(C_5H_8)_n$ $n > 8$

(b) Derivados Terpénicos

Tambien llamados **terpenoides**, incluyendo los poliprenoles, contienen grupos característicos de varios tipos tales como hidroxilos (OH), carbonilos (CO), carboxilos (COOH), función ester (COO-R), cetona ,etc. Los terpenos o derivados tienen mucha importancia debido a sus múltiples usos en farmacia y en la industria; asimismo, a pesar de que la tecnología química ha logrado sintetizar a los terpenos de mayor importancia económica, la tendencia actual del consumo se dirige hacia los productos de origen natural, lo que ha determinado mantener la vigencia de las fuentes vegetales, dentro de ellas los productos forestales siendo los más importantes los aceites de pino (pineno, monoterpeno),a. de eucalipto (cineol, monoterpenoide), a. de cedro (cedrol, sesquiterpenoide) resina de pino (ácido abiético, diterpeno), el látex (caucho, politerpeno), etc.

2.8.1.1.3 Compuestos Fenolicos

Constituyen un grupo muy heterogéneo en su composición; poseen uno o más unidades fenólicas, combinados en ciertos casos con unidades de azúcares. Las sustancias fenólicas se ubican preferentemente en el duramen y en la corteza, presentándose en menor cantidad en la zona de albura, sus propiedades fungicidas las protege en forma efectiva de ataques microbiológicos; asimismo, contribuyen a la coloración natural de la madera. Sin embargo, en los procesos de obtención de pulpa, ciertos extractivos fenólicos (pinosilvina y taxifolina en coníferas) inhiben la cocciones ácidas. Los compuestos fenólicos más conocidos, (Sjostrom, Lock), presentes en la madera son :

Taninos Hidrolizables

Por hidrólisis dan ácido gálico y a. elágico, además de azúcares (glucosa). Estos extractivos no son comunes en madera, pero si en frutos, como la vaina del fruto de la tara (*Caesalpinea tinctorea*);

Flavonoides

Son polifenoles, con esqueleto carbónico del tipo C6:C3:C6 y sus polímeros son denominados taninos condensados. Se les ubica en la madera y corteza de árboles; como ejemplo de estos extractos se tiene a la crisina en *Pinus*, taxifolina en *Pseudotzuga*; del tipo catequina se encuentran en quebracho (*Schinopsis*) y castaña (*Castanea*), y en corteza de *Eucalyptus* y *Betula*;

Lignanos

Formados por enlaces oxigeno de dos unidades de fenilpropano (C6:C3). Como ejemplo se menciona a la conidendrina (en abetos), pinoresinol;

Estilbenos

(1,2 difeniletileno) poseen un doble enlace conjugado y son extremadamente reactivos. Como ejm. representativo se tiene a la pinosilvina (*Pinus*);

Tropolones

Conformado por un anillo insaturado de 7 carbonos y esta presente en muchas coníferas resistentes a enfermedades, tales como *Cedrus* y en *Cupressus*; como ejm. representativo se tiene a la α, ß y δ thujaplicina, en duramen de cedro rojo del oeste (*Thuja plicata*)

Coumarinas

Es un derivado del benzofurano (cumarona); debe su nombre a que se obtuvo por primera vez del árbol denominado "tonka" (*Coumarona odorata*); se presentan principalmente en diversas partes de plantas de la familia Umbeliferae y Rutaceae, en la actualidad se conocen más de 800 tipos de coumarinas. De fórmula general $C_9H_6O_2$.

2.8.2 Clasificacion General de los Extractivos

En este caso, la clasificación se hace de acuerdo a la forma de obtención del extractivo de la planta, por su principal uso o importancia económica, siendo los extractivos más importantes los siguientes:

(a) Aceites Esenciales

Corresponde a un grupo de compuestos orgánicos volátiles, principalmente terpenos y derivados, los cuales presentan un particular olor, según el origen. se ubican en diferentes partes de las plantas (hojas, madera, flores) cumpliendo diferentes funciones (fisiológicas, energéticas, de control biológico, etc.). La mayoría de los aceites esenciales son separados de la planta por diversos métodos de destilación y/o con solventes neutros.

(b) Resinas

Compuesto orgánico o mezcla de polímeros naturales, de origen vegetal,los que pueden ser sólidos o líquidos a temperatura ambiente; se obtienen provocando una herida en la albura de ciertos árboles, de donde fluye como un exsudado, denominado tambien como la oleorresina; este producto esta conformado por una mezcla de compuestos volátiles (terpenos y agua) y derivados terpénicos de alto peso molecular.

(c) Látex

Es obtenido de la corteza de ciertos árboles, mediante un procedimiento externo denominado **sangría** que viene a ser un corte a profundidad, lo que permite la exsudación del extracto. Las plantas laticíferas exsudan un jugo blanco, **látex,** cuya composición es muy variable, de acuerdo a la especie; físicamente su conformación corresponde a una dispersión acuosa de partículas en constante movimiento browniano; quimicamente corresponde al isopreno, formado por **n** unidades terpénicas. El látex fluye de una estructura tubular de la corteza interna (tubos laticíferos) de las ramas y el tronco, y en menor grado de las hojas y raíces. En la actualidad, la principal fuente comercial de látex corresponde a la especie *Hevea brasilensis;*

(d) Taninos Vegetales

Compuesto capaz de combinarse con la piel, formando un complejo siendo el nombre del producto cuero; la combinación del tanino con la piel es de naturaleza química coloidal. La composición química de los taninos es muy variada; principalmente esta formada por

compuestos fenólicos, presentando tambien diferentes componentes químicos como los ácidos gálico, elágico, protocatéquico, polihidroxifenoles. Mayormente se les encuentra como constituyente o extracto en madera y frutos.

(e) Ceras

Físicamente corresponde a un grupo entre resinas y grasas, pero químicamente es un éster de una larga cadena de un ácido alifático con una gran cadena de un alcohol alifático. En las plantas, las ceras ayudan a regular el balance de agua . La fuente vegetal comercial más importante de ceras son las palmeras.

(f) Gomas

Son sustancias poliméricas que se disuelven o se hinchan fácilmente en agua, lo que la diferencia rápidamente de las resinas (solubles en solventes orgánicos) y de los coagulados de látex. Químicamente esta conformado por azúcares en cadenas lineales y ramificada, siendo su unidad más importante las hexosas. Del árbol son obtenidos como un exsudado , siendo su producción favorecida por condiciones climáticas adversas (calor, sequía, vientos). Las gomas de origen forestal más conocidas son la g. arábiga (*Acacia*), g. tragacanto (*Astragalus*), g. karaya (*Sterculia*) y g. ghattti (*Anogeissus*).

2.9 Composición Química de Maderas Tropicales

En el cuadro 1.11 se presentan las características de la madera de 50 especies de la Amazonía del Perú. Algunas maderas han sido seleccionadas en función de la disponibilidad comercial del mercado en la ciudad de Lima. Las especies son destinadas para laminado, lupuna y capinuri, y las demas se destinan para aserrio, variando su uso como madera para cajoneria y moldurados (maderas de densidad menor a 0,5) y madera para parquet, durmientes y estructura (densidad mayor a 0,5). Las especies comerciales son provenientes de bosques productivos de tipo aluvial y de colinas. La utilización de estas especies en la industria forestal implica un alto volumen de desperdicio, mayor al 50% del volumen total.

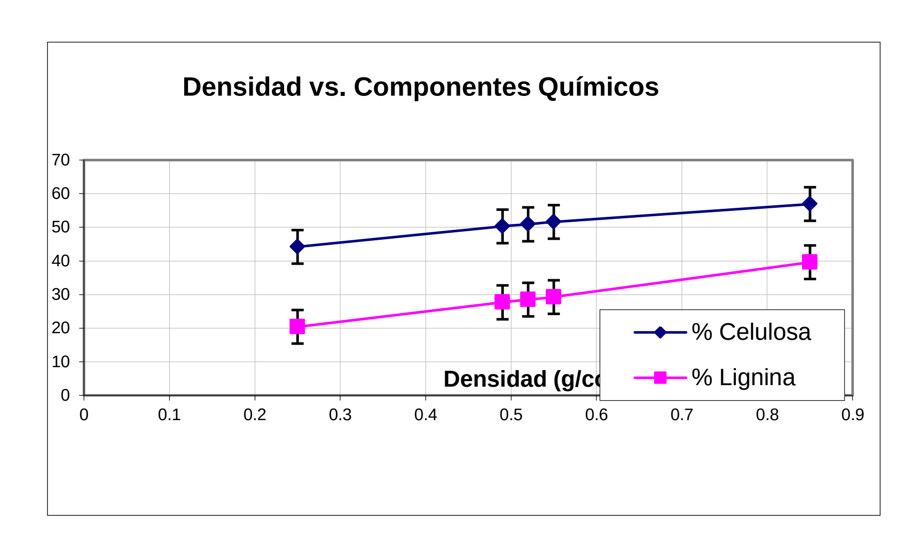
Las maderas no comerciales corresponde a especies no disponibles en el mercado de la ciudad de Lima. Muchas de estas especies provienen de bosques secundarios o bosques intervenidos. El motivo de no ser utilizada comercialmente se debe a la poca durabilidad y baja resistencia mecánica de la madera; en otros casos corresponde a un desconocimiento de las propiedades tecnológicas de la madera para diferentes usos.

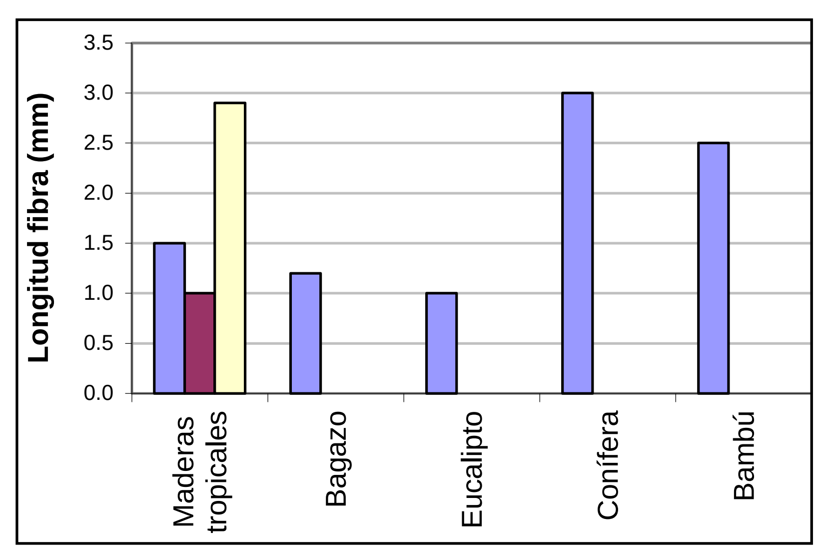
En el cuadro 1.12 es mostrado un resumen estadístico de todas las especies evaluadas: la densidad promedio de todas las especies estudiadas es 0,52, con un rango entre 0,25 a 0,85. En el caso de longitud de fibra, el valor promedio es de 1,5 mm, con un rango entre 1 a 2,9 mm. En lo que se refiere al contenido de sílice, el valor promedio, 0,33, es inferior al de las gramíneas, aunque exepcionalmente se encuentran especies con un alto valor de sílice.

CUADRO 1.11: Características de la Madera de 50 Especies de la Amazonía.

Nombre Científico	Nombre Común	Db (g/cm³)	Lf (mm)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Sílice (%)
1. Alchornea triplinervia	Zancudo caspi	0,45	1,7	52,3	29,9	0,24
2. Anacardium excelsum	Sacha casho	0,41	1,0	48,3	26,7	0,33
3. Aniba amazónica	Moena amarilla	0,56	1,3	50,0	28,1	0,25
4. Apeiba membranaceae	Maquisapa	0,29	1,6	53,8	29,0	0,32
5. Brosimum uleanum	Manchinga	0,60	1,2	51,5	28,7	0,16
6. Cabralea sp.	Requia	0,52	1,7	49,3	29,8	0,03
7. Caussapoa villosa	Sacha uvilla	0,39	1,2	53,9	27,8	0,02
8. Cecropia leucocoma	Shiari	0,25	1,6	52,0	24,4	0,10
9. Cedrelinga catenaeformis	Tornillo	0,45	1,3	54,1	29,7	0,49
10. Ceiba pentandra	Lupuna	0,26	2,1	50,0	27,4	0,21
11. Ceiba samauma	Huimba	0,57	2,9	45,8	36,7	0,21
12. Clarisia racemosa	Mashonaste colorado	0,57	1,3	49,2	29,1	1,24
13. Clarisia sp.	Capinuri de altura	0,30	1,3	50,2	31,3	0,50
14. Copaifera officinalis	Copaiba	0,61	1,4	46,3	31,3	0,20
15. Couma macrocarpa	Leche caspi	0,45	1,7	46,7	29,3	0,02
16. Croton sp.	Shamboquiro	0,42	1,6	51,0	30,9	0,13
17. Endlicheria wiliamsii .	Isma moena	0,36	1,5	51,9	30,4	0,08
18. Guarea trichilioides	Requia colorada	0,60	1,5	49,3	29,8	0,03
19. Guatteria decurrens	Carahuasca 1	0,52	1,9	51,1	27,2	0,2
20. Guazuma crinita	Bolaina	0,41	1,3	53,5	24,5	0,19
21. Huberodendron swietenioides	Sacha caoba	0,45	1,6	52,7	32,7	0,13
22. Hymathantus sucuuba	Bellaco caspi	0,53	1,5	50,9	24,9	0,06
23. Inga braxhyrachis	Poroto shimbillo	0,60	1,3	44,2	31,2	0,06
24. Inga marginata	Shimbillo colorado	0,60	1,1	56,0	28,0	0,50
25. Iryanthera laevis	Pucuna caspi	0,60	1,6	46,9	32,4	0,05
26. Iryanthera tessamannii	Cumala colorada	0,59	1,7	50,2	22,1	0,07
27. Jacaranda copaia	Huamansamana	0,33	1,2	53,0	28,7	0,17
28. Licania elata	Apacharama	0,74	1,6	51,9	29,2	1,94
29. Macoubea spruceii	Yahuar huayo	0,50	1,9	48,1	23,8	0,06
30. Manilkara sp.	Balata gomosa	0,85	1,4	53,1	27,3	0,41
31. Matisia bicolor	Machín sapote	0,48	2,4	47,7	39,6	0,03
32. Matisia cordata	Sapote	0,42	2,4	49,4	33,7	0,03
33. Miconia poeppigii	Rifari	0,52	1,0	54,4	26,4	0,07
34. Micranda spruceana.	Shiringa masha	0,53	2,2	54,0	27,8	0,15
35. Nectandra sp.	Moena Blanca	0,50	1,3	50,9	28,2	0,41
36. Oliganthes sp.	Yanavara	0,53	1,1	52,3	29,2	0,08
37. Perebea chimicua	Yanchama	0,56	1,0	51,8	29,9	0,54
38. Protium llewelni	Copal	0,61	1,0	48,2	24,2	0,54
39. Pterocarpus sp.	Palo de sangre	0,70	1,3	51,4	28,9	0,08
40. Schweilera equitoensis	Machimango colorado	0,72	1,6	51,1	29,9	0,76
41. Sclerolobium paniculata	Tangarana de altura	0,42	1,1	49,7	27,9	0,50
42. Sclerolobium sp.	Tangarana de altura blanca	0,50	1,0	50,5	25,4	0,17
43. Simarcuba amara	Marupa	0,36	1,8	46,9	28,3	0,15
44. Sterculia sp.	Huarmi caspi	0,38	1,7	53,2	25,2	0,15
45. Symphonia globulifora	Azufre caspi	0,58	1,9	51,7	24,2	0,13
46. Terminalia sp.	Yacushapana	0,70	1,3	45,9	33,1	0,09
47. Trichilia sexantera	Requia blanca	0,60	1,8	48,3	30,7	0,19
48. Virola rufula	Cumala blanca	0,45	2,2	50,3	24,7	0,21
49. Vochysia lomatophylla	Quillo sisa	0,36	1,2	52,6	26,3	0,55
50. Xantoxylon sp.	Huiracaspi	0,35	1,6	50,1	20,4	0,38

Db densidad básica; Lf longitud de fibra





CUADRO 1.12: Resumen de los Valores de las Características de 65 maderas estudiadas.

	Promedio X	Límite inferior de X (95%)	Límite superior de X (95%)	Valor mínimo	Valor máximo	CV%
Db	0,52	0,49	0,55	0,25	0,85	25
Lf	1,5	1,40	1,59	1,0	2,9	26
Celulosa	50,9	50,3	51,6	44,2	56,9	5
Lignina	28,5	27,7	29,3	20,4	39,6	11
Sílice	0,33	0,21	0,44	0,02	2,49	138

Db densidad básica; Lf longitud de fibra
CV coeficiente de variación

III LA TRANSFORMACION QUIMICA DE LA MADERA

3.1 DEFINICION

Corresponde a un proceso que implica un cambio o modificación de la estructura química de la materia con relación a su estado inicial; los cambios ocurridos en la composición química de la madera son irreversibles.

Durante la transformación ocurren una serie de cambios en la estructura de los componentes mayores (celulosa, hemicelulosas y lignina) los que sufren reacciones de hidrólisis y/o despolimerización, modificación de sus enlaces, solubilización parcial o total. En el caso de los componentes menores (extractivos) generalmente volatilizan o solubilizan en el medio de reacción; los minerales (cenizas) permanecen estables o tambien forman sales complejas con los reactivos. Como referencia, a continuación se muestran los rangos porcentuales, de los componentes químicos en la madera, por grupo de especies:

CUADRO 3.1 Composición Química de la Madera

	LATIFOLIADAS	CONIFERAS
celulosa	45 a 50 %	40 a 45 %
lignina	18 a 25 %	22 a 30 %
hemicelulosas	20 a 30 %	20 a 25 %
extractivos	1 a 10 %	3 a 12 %
cenizas	< de 5 %	< de 2 %

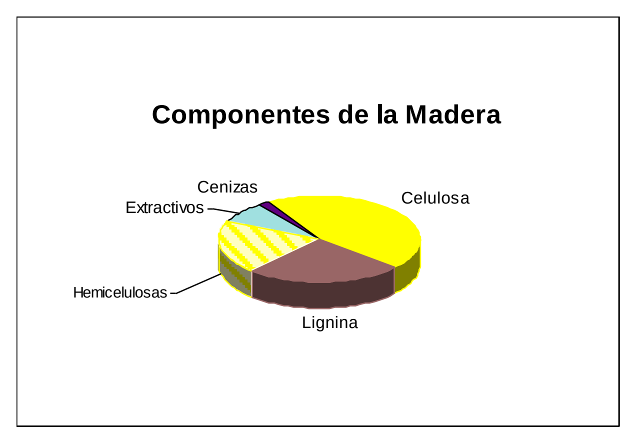


FIGURA 3.1: Distribución de Componentes en la Madera

La diferencia en la composición química siempre será algo evidente entre los árboles, siendo posible generalizarlas entre las maderas de coniferas y latifoliadas, tal como se muestra en el cuadro anterior . Esta diferencia definitivamente influye en su comportamiento frente a los diferentes procesos y sus resultados; habrá por tanto diferencias cualitativas y cuantitativas en los productos obtenidos de la transformación química. Asimismo, cabe mencionar que tambien se van a encontrar diferencias entre generos y entre especies; pero tambien existe variación dentro de una especie por efecto de la edad, calidad de sitio, condiciones ambientales, etc., factores que influyen en la composición química de la madera. Por tanto, en este caso se concluye que cada madera, dependiendo de su clasificación u origen, dará diferentes resultados y calidades de producto al ser utilizadas como materia prima en la transformación química.

De lo antes mencionado se deduce que, en las industrias respectivas, si se desea obtener productos de calidad con características aceptables, tal como lo exige la demanda actual, debe ser de suma importancia realizar una buena selección y clasificación de la madera. La tendencia que se nota cada día para la satisfacción de mercados exigentes, basados en los criterios de calidad total, hará que sólo subsisten a mediano o largo plazo, las industrias que manejen mejor sus recursos; en el caso de las industrias químicas forestales un criterio a tomar en cuenta será sin duda el mejor conocimiento de la composición química de la materia prima. Cabe resaltar la predominancia hoy en día del criterio de calidad total muy influyente no sólo en el que elabora el producto sino tambien en los abastecedores de materia prima, provedores de insumos y los consumidores. En el caso de los ingenieros forestales, responsables mayormente del manejo del recurso maderero, les cabe el deber de mantener una eficiencia en cuanto a producción y abastecimiento regular de materia prima de calidad.

3.2 FORMAS DE TRANSFORMACION QUIMICA DE LA MADERA

Con relación a la composición inicial, existen diferentes formas de transformación química, las que se clasifican de la siguiente manera:

3.2.1 INCORPORACIÓN DE PRODUCTOS

Se refiere a todo proceso que implica agregar un producto químico a la madera, con diferentes fines como son su preservación (para prolongar su vida útil), o aplicación de agentes ignífugos. La aplicación de estos productos no altera la estructura química de los componentes mayores; sin embargo puede alterar la composición de los extractivos y aumentar el contenido de cenizas en la madera. Como ejemplo se tiene los métodos de preservación,

que utilizan sales minerales y compuestos orgánicos que se aplican sobre la madera de diferentes maneras.

3.2.2 EXTRACCIÓN

Proceso que implica la eliminación de los compuestos que se comportan como fluídos en la madera (extractivos); en este caso se utilizan diferentes métodos de extracción, siendo los más utilizados los siguientes:

3.2.2.1 Métodos de Extracción libre

En este caso, el extractivo fluye al exterior o libremente fuera del arbol en pie como respuesta a un efecto o daño provocado. Si bien el concepto de cambio irreversible en la estructura química es aplicado para este método, esto sería válido para el momento de la extracción, ya que el fluído se puede regenerar como resultado de la actividad fisiológica (metabólica) del árbol. Como extracción libre se puede diferenciar a los siguientes casos:

Resinación

Del árbol, que permite que los extractivos salgan hacia el exterior através de los canales resiníferos; por el tipo de elemento mencionado, este método debería corresponder sólo cuando se trabaja con especies coníferas, sin embargo el concepto se extiende para las latifoliadas. En la resinación la incisión provocada en la superficie del árbol, hasta la zona de albura, alcanza a los canales que contienen el extractivo y, por la presión interna del árbol, fluye al exterior. Como ejemplo de este método se menciona a la obtención de la oleorresina del pino, extracción de resinas de copaiba, sangre de grado etc.

Sangría

Concepto similar al caso anterior, sólo que en este caso la incisión sólo se efectúa hasta la zona de corteza, donde se encuentran los canales de transporte del extractivo. El ejemplo más común en este caso es la extracción de látex del caucho (*Hevea brasilensis*) , originaria de la Amazonía; los tubos laticíferos de la corteza de esta especie contienen un extractivo, de composición química coloidal, de mucha importancia económica.

Extractivos de agallas

En este caso como respuesta al daño externo de un agente externo (picaduras de insectos, condiciones ambientales, daños de animales, etc.) el árbol libera un extractivo que protege la zona dañada mientras se regenera el tejido. Son casos poco comunes, y en ciertos casos se liberan extractivos que puedan tener importancia económica, como es el caso de los taninos obtenidos de agallas en árboles de *Eucalyptus* spp.

3.2.2.2 Métodos de Extracción Forzada

Ahora, la extracción se efectúa sobre la madera o árbol cortado, por acción de un solvente y/o energía externa que permita la liberación del extractivo. Dentro de este método distinguimos a :

Extracción con solventes inertes

Se aplica el concepto de solubilidad de los extractivos. Se utilizan como solventes el agua fría, a. caliente, solventes orgánicos (etanol, benceno,etc.) y se aplican sobre la madera previamente reducida a fracciones pequeñas (aserrín o astillas). El solvente utilizado depende del grado de solubilidad del extractivo , aunque luego de la extracción se puede encontrar una mezcla de extractivos con características afines. Un ejemplo para este caso corresponde a la extracción de taninos a partir de la madera o corteza de ciertas especies, empleando como solvente agua caliente.

Destilación

En este caso es importante la propiedad de ebullición o volatilidad del extractivo; el método de destilación puede ser simple , con agua y/o vapor o d. seca, dependiendo del grado de difusión del extracto dentro de la materia prima. Mayormente se aplica para obtener aceites esenciales , empleando el método de destilación con vapor .

3.2.3 DISOLUCIÓN O CAMBIO DE LA ESTRUCTURA QUÍMICA

Corresponde a la forma más importante de transformación química , donde van a ocurrir modificaciones irreversibles en los componentes mayores de la madera. Dependiendo de las condiciones y medio de reacción, dentro de esta forma se pueden diferenciar a los siguientes:

3.2.3.1 PULPEO

La obtención de pulpa es un proceso que implica la disolución parcial o total de la lignina, con alteración a su estructura polimérica, ya sea con la aplicación de energía química y/o e. mecánica, eliminando el factor cohesión de las fibras. El producto final corresponde a las fibras celulósicas o tambien denominada **pulpa**. Se pueden distinguir tres tipos

de procesos de pulpeo:

(a) **PROCESO QUIMICO**

La pulpa es obtenida por acción de energía química (reactivos) aplicada a la materia prima bajo condiciones controladas, principalmente de temperatura, presión, tiempo y velocidad de reacción; la separación de las fibras se logra con una disolución de la lignina de la lámina media. El proceso de pulpeo es denominado cocción o digestión y se lleva a cabo en autoclaves o digestores.

(b) **PROCESO MECANICO**

Las fibras celulósicas se separan exclusivamente por aplicación de energía mecánica que vence el factor cohesión de la lámina media entre las fibras. Este proceso denominado desfibrado, se efectúa bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad de desfibrado. Básicamente se conocen dos tipos de desfibradores : de piedra y de discos.

(c) **PROCESO MIXTO**

En este caso, la separación de las fibras se logra por la aplicación de dos tratamientos secuenciales, químico y mecánico. En el primero, con la aplicación de los reactivos químicos, hay un ablandamiento y/o solubilización parcial de la lignina en la lámina media ("suavizamiento" de la materia prima); luego, en la segunda etapa se continua con el desfibrado mecánico que separa completamente a las fibras.

3.2.3.2 SACARIFICACIÓN

Es un tratamiento químico que implica la descomposición de los carbohidratos de la madera (holocelulosa) en azúcares simples. La descomposición de la celulosa y hemicelulosas ocurre por la acción de un agente ácido, utilizándose principalmente ácido clorhídrico o a. sulfúrico; estos ácidos desdoblan a la celulosa, rompiendo sus enlaces ß,1-4, convirtiéndose en hexosas; de igual modo, las hemicelulosas se desdoblan en hexosas y/o pentosas. Asimismo, las hexosas (glucosa) son tratadas por métodos de fermentación obteniéndose alcohol etílico, levaduras y dióxido de carbono, productos con diferentes usos. Tambien, como residuo de la sacarificación queda la lignina, que sufre pocas modificaciones en su estructura, es muy reactiva y por su caracter fenólico, puede ser utilizada para la fabricación de diferentes productos o tambien, por su poder calórico, para la elaboración de briquetas de alto poder energético.

3.2.3.3 DESCOMPOSICION TERMICA DE LA MADERA

En este caso la transformación de la madera ocurre por acción del calor; como parámetros de control se tiene la temperatura, velocidad de reacción y concentración de oxígeno, los cuales definen los métodos de descomposición :

(a) **COMBUSTION**

Ocurre por la presencia de calor (temperatura mayor a los 200 °C) y oxígeno (condición áerobica). Por una combustión completa, los componentes de la madera se transforman principalmente en agua (vapor), gases (CO_2) y cenizas.

(b) **CARBONIZACION**

En este caso se requiere calor (con temperatura entre 350 - 500 C) pero en ausencia de oxígeno o aire (condición anaeróbica). Luego del tiempo respectivo, la madera se transforma en carbón vegetal, que es el principal producto; pero tambien se generan gases, que luego de enfriarse, corresponden a una fase líquida (gases condensables) y f. gaseosa (gases no condensables). El método que implica la recuperación, con fines comerciales, de la fase líquida de la carbonización es denominado **Destilacion Seca De La Madera**; los gases condensados o licor piroleñoso tienen un valor relativo ya que contienen dentro de su composición productos aprovechables tales como ácido acético, alquitranes, acetona, alcohol metílico, etc.

(c) **GASIFICACION**

En este caso la madera se descompone a temperaturas mayores a los 800 °C, hasta los 1200 C, en etapas sucesivas con condiciones aeróbicas y anaeróbicas; el objetivo principal es la transformación de la madera en un gas combustible, con una alta proporción de monóxido de carbono en su composición, para ser utilizado como combustible en motores de ciclo Otto o Diesel (m. de combustión interna), sustituyendo en forma total o parcial a la gasolina o petróleo diesel, respectivamente.

3.2.3.4 CAMBIO POR ACCION ENZIMATICA

Cabe mencionar que en este método la alteración la estructura química de la madera se lleva a cabo por medio de la acción de enzimas de microorganismos. Si bien la madera presenta resistencia a la acción de los agentes biológicos, se ha desarrollado técnicas de biotecnología en laboratorio y en plantas piloto donde, bajo condiciones de trabajo de temperatura, humedad, pH, catalizadores y otros agentes, actuan enzimas que alteran la composición química de la madera. Estas técnicas, que probablemente dominen la industria química forestal en el futuro, se han

aplicado ya para la obtención de pulpas celulósicas, blanqueo y sacarificación, con relativo éxito. La acción de las enzimas esta dirigida a alterar los componentes mayores, celulosa y lignina; esta acción ocurre en forma natural en los procesos de pudrición de la madera como son la p. blanca y la p. negra. En el primer caso el agente biológico genera la enzima *lignasa* que actúa sobre la lignina, dejando como residuo a la holocelulosa que presenta un color intrínseco blanco. En cambio, en la pudrición negra la enzima generada por el microorganismo es la *celulasa*, dejando como residuo a la lignina que es de un color intrínseco oscuro. En ambos casos, las enzimas son generadas por hongos xilófagos.

IV. PULPAS CELULOSICAS

4.1 Definición

Es un producto obtenido a partir de una materia prima vegetal, conformado por fibras, con pared de constitución lignocelulósica; las fibras son elementos unicelulares y fusiformes.

Las fibras de madera se obtienen por eliminación del factor cohesión, aplicando algún tipo de energía. El método de separación actua en la zona de unión fibrilar, lámina media, debilitándola o solubilizando sus componentes, pero evitando destruir la pared celular. Se pueden comparar una estructura de fibras y lámina media con una pared de ladrillos y cemento; el ladrillo es el elemento estructural que representa a las fibras, se separan al eliminar la unión que le da el cemento, que representa a la lignina. En la separación, se utiliza algún tipo de energía, química para disolver a la lginina (figura 4.1) o aplicar una energía mecánica (figura 4.2) para separar violentamente las fibras, venciendo el esfuerzo de unión que representa la lignina.

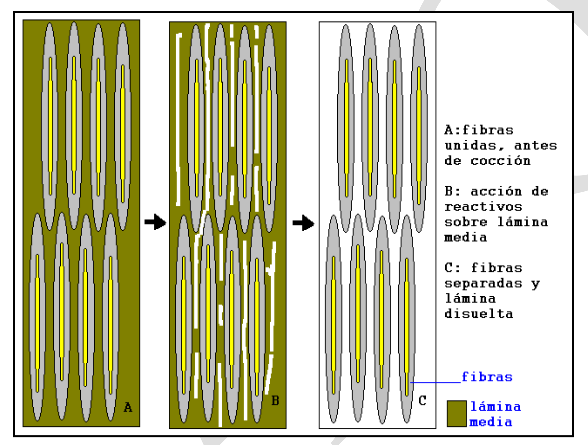


FIGURA 4.1: Representación Gráfica de la Deslignificación Química

Las fibras separadas mantienen, dentro de su composición, la lignina cuya cantidad remanente esta en relación con el método aplicado y su eficiencia. Por esta razón, las pulpas presentan diferentes calidades y comportamientos cuando son transformadas a producto final. La fibra celulósica presenta cualidades de flexibilidad, aptitud a los tratamientos de blanqueo y refinado, durabilidad, inalterable frente a la acción de agentes externos (radiación, calor, humedad, presión). Estas cualidades se deben principalmente por la característica de la pared fibrilar y la estructura cristalina de la celulosa. Si bien existe un efecto de envejecimiento por el uso, la pulpa de fibras vegetales permite obtener diversos materiales (entiéndase producto final) que destacan por sus propiedades de resistencia química y mecánica.

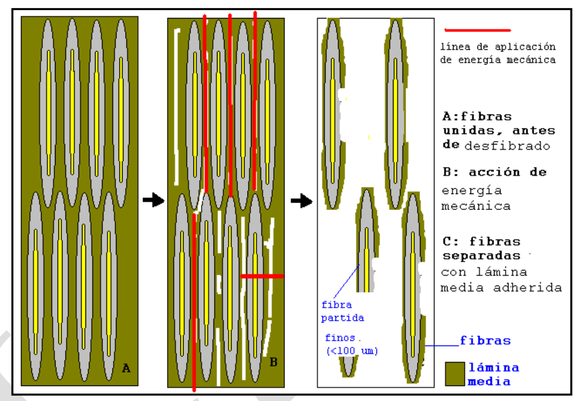


FIGURA 4.2: Representación Gráfica de la Deslignificación Mecánica

4.2 Caracteristicas de las Pulpas

En el caso de las fibras de madera, estas presentan dimensiones que varian entre 800 a 2000 micras (um) de largo en latifoliadas, pero en las coníferas este valor varía entre 3000 a 6000 um . El ancho medio de las fibras esta entre 25 a 45 um y el espesor de pared entre 2 a 10 um. En la fibra, la forma fusiforme, definición para un elemento con largo mucho mayor que el ancho, le permite tener una capacidad de **entrecruzamiento** con otras fibras, al drenar sobre una tela, luego de estar dispersas en un medio acuoso; cabe diferenciar con el término "afieltramiento ", que corresponde a la capacidad de unión de hilos continuos, muy aplicado en la industria textil. Asimismo, por la constitución celulósica de la pared fibrilar, existe una capacidad de formación de **enlaces físico-químicos**, destacando los enlaces de hidrógeno y las valencias secundarias (fuerzas de Van der Waals). En las dos características antes mencionadas, se basa el principio de formación del papel, que viene a ser la principal forma de uso de las pulpas celulósicas.

Con relación a su composición química, se encuentra en las fibras de muchas clases de pulpas, sin blanquear, un porcentaje alto de holocelulosa, comparado con la lignina; la celulosa, principalmente del tipo alfa, constituye la parte

principal de la pared celular y presenta un valor promedio de grado de polimerización entre 800 a 1200 unidades de anhidro glucosa, dependiendo del método de obtención; en pulpas blanqueadas el valor cae hasta un mínimo de alrededor de 300. Cabe resaltar la importancia del grado de polimerización ya que mantiene una relación directa con las propiedades de resistencia de la pulpa y por ende, del papel.

Respecto a la lignina, su distribución y cantidad en las fibras afecta negativamente la aptitud de la pulpa a tratamientos posteriores como son el blanqueo o el refinado al fabricar el papel; la lignina en pulpas químicas se encuentra en porcentajes menores al 5 por ciento, en pulpas semiquímicas, entre 5 a 20 por ciento, y en p. mecanicas, mas del 20 por ciento. La presencia de lignina causa una rigidez y le brinda caracter hidrófugo a la fibra, lo que disminuye su habilidad para el entrecruzamiento y capacidad de enlaces; sin embargo, el caracter termoplástico de este polímero le da importancia a la pulpa cuando se le utiliza en la obtención de tableros de fibras.

Con referencia a las hemicelulosas, en la pulpa presentan diferente comportamiento; en ciertos casos su presencia es negativa ya que no siempre contribuyen a la resistencia y además envejecen en corto tiempo, desmejorando la calidad del producto; en otros casos actuan favorablemente como en el caso de los pentosanos, polisacáridos altamente hidrofílicos, que favorecen el refinado, etapa importante en la fabricación del papel.

4.3 Usos

a) Pulpa para papeles y cartones

Es el uso más importante al cual se destinan las pulpas. Las fibras de pulpa tienen cualidades para formar la estructura del papel; además deben aportar el requisito mínimo de resistencia según el uso. El papel esta constituído por más del 80 por ciento de fibras celulósicas lo que influye significativamente en todas sus propiedades asi como tambien en sus costos de producción. Las pulpas celulósicas presentan propiedades físicas, mecánicas y químicas que varian según el método de obtención; asi por ejemplo, el contenido de lignina residual, a un valor menor del 5 por ciento en pulpas químicas solo afectaría el color por lo que el blanqueo, que es una continuación de la deslignificación, se requiere cuando se destine a papeles blancos. Por lo general, las pulpas químicas tienen buenas propiedades de resistencia, lo que la habilita para fabricar casi todo tipo de papeles, oscuros o blancos. En las pulpas con un mayor contenido de lignina residual, de 5 a 20 por ciento, habrá una interferencia en la capacidad de enlace de las fibras, aunque la resistencia suele ser elevada. Pulpas con alto % de lignina no se blanquean porque habra un perjuicio de su resistencia, ya que por necesitarse mayor cantidad de blanqueador, hay un efecto negativo sobre los carbohidratos y el rendimiento disminuye. Estas, sin blanquear, se destinan para elaborar papeles kraft, para , envolturas, embalajes, cartones corrugados, etc.

En las pulpas donde no ha habido eliminación de lignina durante el proceso de obtención (pulpas mecánicas de piedra), la fibra se va a comportar como un elemento muy rígido, de poca flexibilidad, pero con buena capacidad de absorbancia y además bajo costo, lo que la habilita a ser usada, mezclada con otras fibras de mayor resistencia, en la elaboración de papeles de bajo costo como es el caso del papel periódico (*newsprint*).

b) Tableros de Fibras

Este producto, denominado comercialmente como *fiberboard*, HDF, *"nordex"* o "*cholguán*" en el Perú; para su elaboración se utilizan las denominadas pulpas mecánicas o de alto rendimiento . El tablero esta constituído por las fibras aglomeradas que solidifican bajo condiciones de presión y temperatura. La característica de resistencia de las pulpas utilizadas no es fundamental al inicio de la formación del tablero; las fibras se entrecruzan luego de una dispersión acuosa, formándose un manto fibroso. El tablero solidifica por las condiciones del proceso; más bien en este caso tiene mucha importancia la presencia de la lignina, que por sus características termoplásticas permite su "repolimerización" y por consiguiente la reunificación de las fibras en un producto sólido, de alta resistencia. Si bien la industria de tableros de fibras no tiene la significancia de la industria papelera, se presenta como una alternativa para el aprovechamiento de los residuos madereros para la elaboración de tableros o paneles.

Cabe mencionar que en la actualidad, por las restricciones de las fibras de asbesto, las fibras de pulpas de madera han comenzado a ser utilizadas, con singular éxito, sobretodo el la conformación de los paneles de cemento y calaminas corrugadas.

c) Pulpa Para Disolver

Tambien denominada pulpa soluble (*dissolving pulp*), corresponde a un tipo especial de pulpa química "purificada" o altamente blanqueada. Presenta un alto porcentaje de alfa celulosa (más del 90 % en su composición). La propiedad de este tipo de pulpa es su capacidad para disolverse (dispersión) en un solvente, con introducción de grupos químicos en sus zonas reactivas: Luego, la masa se regenera, ya sea bajo la forma de hilo o lámina. Como productos final se obtienen los llamados derivados celulósicos, destacando los hilos de rayón, láminas de celofán o el acetato. En esta industria, su producción se destina mayormente para la elaboración de hilados sintéticos, siendo el rayón el más importante; este tipo de hilo fue desarrollado con el fin de sustituir al algodón natural; existe aún una industria química textil con rayón, aunque poco competitiva. La importancia del uso de las pulpas para papel se resalta en el cuadro No 4.1

.

CUADRO 4.1: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PULPAS CELULOSICAS 1989-2009

PULPA PARA	PRODUCCION (x 10^6 t)		(%)
Año	1989	2009	
Para papel	149,2	174,1	85,1
Pulpa kraft		118,7	
Pulpa sulfito		4,3	
Pulpa semiquímica		9,1	
Pulpa mecánica		28,5	
Para tableros de fibras	7,3	9,0	4,4
Para disolver	4,5	3,6	1,8
Otras fibras no madereras	5,3	17,8	8,7
TOTAL	166,3	204,5	100

fuente: FAO (www.fao.org)

4.4 Clasificación

Las pulpas celulósicas se clasifican en tres grandes grupos, de acuerdo al tipo de tratamiento o proceso utilizado para la separación de las fibras:

4.4.1 Pulpas Químicas

Son aquellas donde la separación de las fibras de la materia prima se logra por la acción de la **energía química**, proveniente de reactivos aplicados bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo, pH, cantidad de reactivos, relación de dilución y velocidad de reacción. La separación de las fibras o "individualización" se da por la disolución y ablandamiento de la lignina de la lámina media, acción que se acentúa con la intensidad del tratamiento; hay una pérdida de peso al final del proceso debido a la disolución parcial de la lignina, hemicelulosas y extractivos. El bajo contenido de lignina (menos del 5 %) permite que estas pulpas tengan una mejor aptitud al blanqueo, con una mínima degradación, siendo la blancura de la pulpa permanente. Cabe agregar que necesariamente para la acción de los reactivos químicos, la materia prima debe estar reducida a un tamaño adecuado (astillas o "chips" en madera), caracter que define a las reacciones topoquímicas.

Las pulpas químicas son utilizadas mayormente para la fabricación de papeles de calidad, aportando el requisito de resistencia y características superficiales. Los rendimientos varían entre 45 a 55 por ciento; en cambio, en pulpas para disolver, el rendimiento baja a 35 a 40 por ciento, debido al tratamiento posterior de purificación. La clasificación de este tipo de pulpas se hace por el tipo de reactivo utilizado en el proceso de obtención de la pulpa (pulpeo o cocción) , a mencionar en el cuadro 3.2.

CUADRO 4.2 : Características Pulpas Químicas

PROCESO	REACTIVOS	R %
ALCALINO		
Pulpa a la soda	NaOH	45 - 55
Pulpa al sulfato (*kraft*)	NaOH + Na_2S	45 - 50
AL SULFITO		
Bisulfitos	bases Mg, Na y NH_4	50 - 55

R% Rendimiento de pulpa

4.4.1.1 Procesos Alcalinos

Los procesos químicos de pulpeo en medio alcalino corresponden a todos aquellos donde se separa las fibras mediante energía química, llevada a cabo en pH completamente alcalino, generalmente mayor a 10, desde el inicio de la cocción hasta el final de la misma. En teoría se puede utilizar cualquier reactivo químico denominados bases fuertes, es decir corresponde a todos aquellos que se disocian totalmente en el medio de cocción, con una alta concentración del anión **OH**. El principal agente alcalino es el hidróxido de sodio

El más antiguo es el método a la soda, que data desde el siglo pasado; sin embargo en la actualidad el m. al sulfato, que es una modificación del anterior,

el que predomina en la industria mundial de pulpas, por su calidad y mayor resistencia. En ambos casos, el reactivo principal es el hidróxido de sodio que hidroliza y solubiliza a la lignina bajo condiciones controladas; sin embargo, la presencia del sulfuro de sodio en el m. al sulfato favorece la velocidad de reacción, actúa como un reactivo específico sobre la lignina, lo que favorece la estabilidad de la celulosa. Por esta razón, se obtiene una pulpa de mejor calidad y con condiciones menos enérgicas (menor tiempo y temperatura), con los consiguientes beneficios en costo.

A nivel mundial, por la alta industrialización del proceso al sulfato, se ha generado un potencial alto de contaminación, que se controla al reciclar los licores residuales, aunque el problema se debe mayormente por el uso del sulfuro, que genera gases azufrados, contaminando la atmósfera. El problema se complica por el uso de compuestos clorados durante el blanqueo, siendo los reactivos vertidos totalmente como carga de efluentes, contaminando las aguas. Una forma de reducir el efecto contaminante es, el uso de aditivos, como la antraquinona (AQ) que ya se viene utilizando en muchas fábricas; este compuesto actua como un catalizador de los procesos, reduciendo el consumo del sulfuro como parte de la lejía.

Clasificacion

Por el tipo de reactivo, se clasifican en:

1) **Proceso a la Soda:** Patentado en 1854, la primera fábrica inicia su producción en 1866. Fue el primer proceso alcalino, siendo el único reactivo el hidróxido de sodio.

2) **Proceso al Sulfato**: Patentado en 1884 por Dahl, se inicia a escala comercial en el año siguiente. Es una modificación del proceso anterior, utiliza como agentes reactivos el hidróxido de sodio y el sulfuro de sodio.

3) **Proceso Alcalino con antraquinona**: Es un proceso alcalino que incluye la incorporación del aditivo antraquinona como catalizador de las reacciones de deslignificación. La presencia del aditivo permite disminuir la cantidad de reactivo y/o tiempo de cocción.

4.4.1.2 Procesos al Sulfito

Este tipo proceso, ya en desuso, tiene el inconveniente del tiempo largo de cocción (6-8 horas) y de menor resistencia, desventajas por comparación a la pulpa *kraft*. Aún existen algunas fábricas que prefieren los procesos al sulfito por su alta blancura inicial y facilidad de refinado; luego del proceso se obtienen pulpas con blancuras mayores al 50 % (°GE), ya no requiriendo un blanqueo posterior, utilizándose para diversos tipos de papeles de escritura e impresión, embalajes. Las sales utilizadas son b. de sodio, magnesio y amonio, destacando el método químico es el bisulfito de magnesio, que mediante el proceso "magnefite", permite una regeneración rentable de los reactivos utilizados. Las lejías residuales de los procesos al sulfito sirven como fuente de diversos productos químicos, reduciéndose la carga contaminante.

4.4.2 Pulpas Mecanicas

La otra forma de separar las fibras de la madera es utilizando **energía mecánica** o energía cinética y de presión. Esta energía se traduce en esfuerzos de presión, descompresión y cizalladura, lo que favorece la separación de las fibras. En estos casos se utilizan los desfibradores, de piedra o de discos. Para facilitar la separación de fibras, previamente se ablanda la lignina de la lámina media, por una acción combinada de agua y temperatura aunque no se solubiliza al polímero; las fibras separadas mantienen lignina en la pared, dándole el caracter rígido. Al final del proceso sólo hay solubilización de extractivos de la madera; tambien hay formación de partículas o elementos finos, los que en forma conjunta son eliminados durante el proceso, y que implica una pérdida de masa, variable entre 2 a 10 %; el rendimiento de estas pulpas por lo general supera el 90 %.

A las pulpas mecánicas se les considera de calidad inferior por su baja resistencia y gran cantidad de elementos finos; se les utiliza en mezclas con pulpas químicas, en proporciones variables, para obtener principalmente papeles de bajo costo (periódico) y cartones. Según el equipo utilizado y la forma de materia prima, se conocen dos clases de pulpas mecánicas; ver cuadro 4.3.

CUADRO 4.3 : Características Pulpas Mecánicas

Tipo De Pulpa Mecánica	**Código**	Pretratamiento	**Rendimiento %**
Equipo : Desfibrador de piedra; **materia prima** trozas			
PM piedra	SGW		93 - 98
Equipo : Desfibrador discos**; materia prima** astillas			
PM refinada	RMP	ninguno	> a 95
PM termomecánica	TMP	Vapor 120-140 ºC	> 90
P. mecanoquímica	CMP	5-10 %Reactivo	86-90 %
P. Quimiomecánica	CTMP	3-5% Reactivo Vapor 120´140 ºC	>90 %
P. Semiquímica	NSSC	10-15 % Reactivo	60-75 %

Cabe recordar que la pulpa es química siempre y cuando el factor de cohesión fibrilar ha sido **totalmente eliminado** sólo por acción de los reactivos químicos, pero si se ha requerido de un desfibrado complementario, para concluir con la separación de las fibras, el proceso será considerado mecánico o también semiquímico. El tratamiento químico, previo al desfibrado mecánico, pueder ser alcalino o al sulfito.

Por el alto contenido de lignina, las pulpas mecánicas tienen poca aptitud al blanqueo tradicional, con oxidantes (cloro, O_2) para una blancura permanente. Sin embargo, agentes reductores (Hidrosulfitos) le otorgan una blancura temporal, ideal para elaborar papeles de escritura e impresión, de bajo costo.

4.4.2.1 Pulpa mecánica de piedra

El proceso más antiguo es el que utiliza **desfibrador de piedra** (*Stone GroundWood* **SGW**); tiene la ventaja de procesar la madera en troza. La energía aplicada se transmite a través de una piedra de desfibrado, similar a una piedra de esmeril, con condiciones controladas de presión, velocidad de desfibrado, consistencia y temperatura del agua. La desventaja de este método es que se obtienen fibras de menor calidad, con la lámina media aún adherida, manteniéndolas rígidas. Además hay corte o formación de fibras partidas (elementos finos) y paquetes fibrosos (*shives*), lo que desmerece la calidad del producto final. Estas pulpas se utilizan en la elaboración del papel periódico o p. prensa (newsprint).

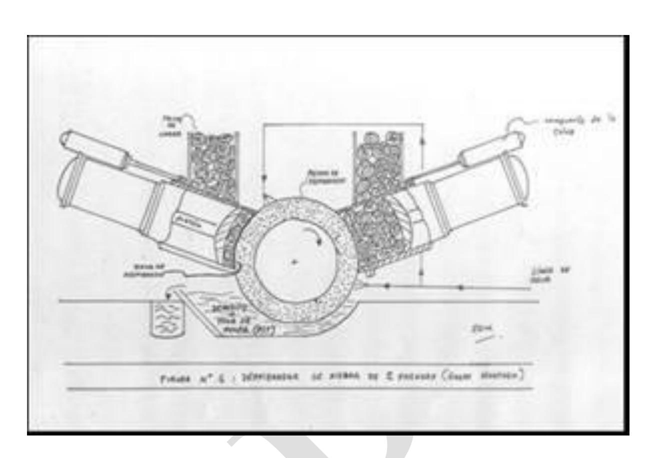


FIGURA 4.3: Desfibrador de piedra

4.4.2.2 Pulpa mecánica de Discos

Hay una tendencia gradual a reemplaza las pulpas de piedra por las pulpas obtenidas con **desfibradores de discos**; en estos casos se requiere del astillado (*chipeado*) de la madera. Los procesos más simples con estos equipos son la pulpa mecánica refinada (*Refiner Mechanical Pulp* RMP) y la pulpa termomecánica (*ThermoMechanical Pulp* TMP); en esta última se requiere de una cámara de alimentación presurizada con vapor de agua, que ablanda la lámina media, facilitando la separación de las fibras.

La pulpa mecanoquímica, a diferencia de las anteriores, se obtienen con tratamientos químicos suaves. De este grupo de pulpas, destaca el proceso alcalino en frío, que trabaja con temperatura menor a 100°C; la materia prima se hincha por efecto del reactivo (NaOH), en un tiempo relativamente corto, lo que facilita la acción de desfibrado. Se utilizan estas pulpas para obtener paneles y tambien cartones.

La pulpa quimiomecánica o quimiotermomecánica (*Chemi-Thermo Mechanical Pulp* - CTMP), corresponden a una innovación de las termomecánicas; el tratamiento químico es muy suave, aplicado a temperaturas altas y tiempos muy cortos. En la actualidad, con este tipo de procesos, bajo en reactivo y alto rendimiento, va logrando una mayor aceptación con un mayor número de fábricas instaladas a nivel mundial. La pulpa CTMP se puede blanquear, con agentes reductores, se le denomina *Bleached CTMP* o BCTMP, con un valor de blancura comparable a las pulpas químicas, y con características superficiales similares a las pulpas químicas, lo que permite su reemplazo parcial en la formulación de papeles de bajo costo. La pulpa

CTMP sin blanquear, se utiliza para cartones; la pulpa BCTMP se emplean para papel de impresión de bajo costo.

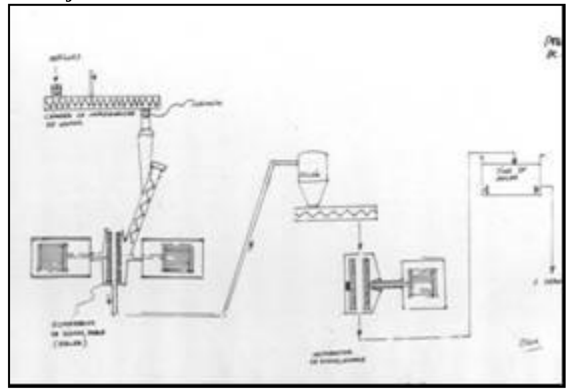


FIGURA 4.4.: Desfibrador de Discos

4.4.2.3 Pulpas Semiquímicas

El tratamiento químico aplicado es con sulfito, denominado sulfito neutro (*Neutral Sulphite SemiChemical* NSSC) con base de sodio o amonio. Durante el proceso, se utiliza **energía química** y **energía mecánica**, en proporciones similares. El tratamiento químico favorece la hidrólisis y solubilidad parcial de la lignina, de la lámina media. En la etapa mecánica, con desfibradores de discos, se separan las fibras y se consume menos energia, obteniéndose una pulpa menos degradada, con características intermedias entre las químicas y las mecánicas. La presencia de lignina reduce la capacidad de enlace interfibrilar y por consiguiente la resistencia en el papel. En el caso de papeles para corrugar, la presencia de lignina es favorable, actuando como un componente que favorece la rigidez de la onda en el cartón. Esta pulpa se utiliza para elaborar cartones. La producción mundial de este tipo de pulpa tiende a ser reemplazada por las pulpas mecánicas.

4.5 Resistencia de Pulpas Celulósicas

En el **cuadro No 4.5** se muestra la variación de resistencia por tipo de pulpa.

CUADRO 4.5: Resistencia en Pulpas Celulósicas

PULPA	RESISTENCIA
P. QUIMICA : pulpa kraft	
Alcalinas	muy alta / alta
Sulfito	alta / media
P. Semiquímicas	
Quimiomecánica	media / baja
P. MECANICA	
de discos	media / baja
de piedra	baja / muy baja

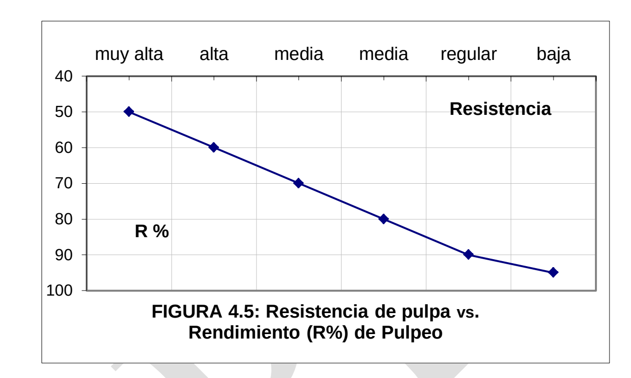


FIGURA 4.5: Resistencia de pulpa vs. Rendimiento (R%) de Pulpeo

La resistencia de las pulpas celulósicas varia en función del rendimiento de pulpa y de su grado de deslignificación; ver figura 4.5.

La alta resistencia y bajo rendmiento en las pulpas químicas se explica por el alto porcentaje en celulosa ybajo en lignina; la baja resistencia y alto rendimiento en las pulpas mecánicas se explica por el alto porcentaje de lignina y bajo en celulosa.

4.6 Materias Primas Fibrosas

Acorde con la definición de las pulpas celulósicas, las materias primas de origen vegetal, deben tener un alto porcentaje de tejido leñoso en su constitución; en la práctica se encuentra tejido leñoso o lignocelulósico (celulosa + lignina) en toda la planta, pero destacan las partes más rígidas quue cumplen una función de soporte o estructural en la misma. La parte más importante es el tallo, siguiendo en orden de importancia, la corteza, las hojas y frutos.

4.6.1 Clasificación

Con el fin de ilustrar mejor el tipo de fibras lignocelulósicas, se adopta la clasificación de materias primas para pulpa, propuesta por Isemberg (Libby-1967), que se menciona a continuación:

a) Fibras de frutos	-algodón (linters, desecho textil); - fibra del kapok (Bombacaceae);
b) Fibras de hojas	- suculentas (cabuya, sisal, etc.); -peciolo palmera (palma africana,)
c) Fibras de tallos	
c.1 Haces	- bagazo de caña de azúcar;

vasculares	- tallos cereales (arroz, trigo); - bambú (*Bambusa*); - otras: esparto, caña brava
c.2 Fibras liberianas (floema)	- cáñamo de manila, yute; - corteza àrbol (latifoliadas);
c.3 Xilema o leño (madera)	- latifoliadas (hardwoods); - coníferas (softwoods)

4.6.2 Fibras de No Madera

Las fibras de no madera (de frutos, hojas, haces vasculares y fibras liberianas), según el cuadro N°1, representan el 7,6 por ciento de la producción mundial de pulpa. En la mayoria de los casos, esta materia prima corresponde a un **residuo agrícola** como el bagazo de caña, tallos de cereales, linters de algodón, etc. que se obtienen al final de cada campaña, y que puede ser de una a dos veces al año. En otros casos se les cultiva anualmente, sólo para producción de pulpa (**plantas anuales**) o cosechada cada 2-3 años como el bambú. Sin embargo, cabe resaltar que existen muchas materias primas que tienen un gran potencial de uso para la fabricación de pulpa, pero que a la fecha no se les da la importancia del caso.

4.6.3 Fibras de Madera

A nivel mundial, representa más del 92 por ciento de la producción mundial de pulpa (cuadro N°4.6)

Cuadro 4.6: Producción Pulpas Celulósicas

PRODUCTO	PRODUCCION (x 10^6 t)
Pulpas de madera	153,7
Pulpas no madera	12,6
TOTAL	**166,3**

fuente: FAO (1989)

La ventaja principal de la madera radica en la mayor concentración de fibras celulósicas, comparadas con las de no madera. Sin embargo, a pesar que todas las especies madereras presentan aptitud para el pulpeo, es necesario tener en cuenta los siguientes requisitos, al seleccionar una especie forestal para la industria celulósica:

i) Densidad básica debe estar en un rango entre 400 a 700 kg/m^3 ; menores a 400, disminuye la capacidad útil del digestor y la productividad de la fábrica; mayores a 700, es difícil la preparación de la materia prima y la deslignificación, aumentando los costos;

ii) Debe utilizarse especies de rápido crecimiento, con turnos de rotación de 8 a 20 años;

iii) Bajo costo de la madera cosechada;

iv) Bajo valor comercial actual, evitando su competencia frente a otras formas de usos que pague mayores precios por la madera

v) Debe presentar bajo porcentaje de parénquima; que es un tejido no fibroso que consume reactivos durante el proceso y es causa de bajos rendimientos.

vi) En el análisis químico, la madera debe tener:
- Alto porcentaje de celulosa
- Bajo contenido de lignina
- Dentro de las hemicelulosas, que tenga alto contenido de pentosanos (favorable al refinado)
- Bajo contenido de extractivos
- Bajo contenido de cenizas, en especial de sílice, debido a su abrasividad.

Sobre la misma especie, se prefiere árboles con:

vii) Fuste recto, lo que facilita la manipulación, el almacenamiento y alimentación a la astilladora;

viii) Bajo porcentaje de corteza en troza (10-15 % de masa ó 15- 20 % volumen); la corteza aporta bajo contenido de fibras pero alto en extractivos y cenizas.

ix) Madera no tensionada; las tensiones internas favorecen el aumento de la cantidad de incocidos en pulpeos químicos;

x) La madera debe tener una durabilidad natural mínima, para ser almacenada por mucho tiempo (mínimo 3 meses) sin sufrir deterioro.

CUADRO N° 4.7: Especies Forestales Utilizadas en la Industria de Pulpa

LATIFOLIADAS	**PAÍS O REGIÓN**
maple (*Acer sp.*)	EEUU, Canadá
aliso (*Alnus* sp.)	EEUU, S. Europa
abedul (*Betula* sp.)	Canadá, N. Europa
álamo (*Populus* spp.)	EEUU, Europa
Eucalyptus globulus	España, Portugal, Chile, Uruguay
Eucalyptus regnans	Australia
Eucalyptus saligna	Brasil, Argentina
Eucalyptus grandis	India
Gmelina arborea	Brasil
CONIFERAS	
abeto (*Abies* sp., *Picea* sp.)	EEUU, Canadá, N. Europa
Pinus elliotti	EEUU , Brasil
Pinus.patula	EEUU, Sudáfrica

Pinus radiata	Chile,N. Zelandia, Sudáfrica
Pinus pinaster	España, Francia
Pinus sylvestris	Europa
Pinus caribaea	Centroamérica, Colombia, Venezuela

fuente: FAO (1973 et al)

Cabe agregar que las especies forestales utilizadas en la industria de pulpa no necesariamente cumplen con todos o la mayoría de los requisitos; al momento de decidir en la selección de una especie forestal, predomina el criterio relacionado con un abastecimiento de madera oportuno y que finalmente permiten obtener una pulpa de bajo costo y calidad aceptable para su uso en la industria del papel. De esta manera, a nivel mundial llegan a predominar como fuente de materia prima para la industria celulósica, plantaciones de diferentes especies, algunas de ellas citadas por FAO (1973) y otros autores. Información sobre especies utilizadas en la industria de pulpa a nivel mundial son mostradas en el cuadro N° 4.7.

4.6 Calidad de Pulpas Celulósicas: Evaluaciones en Materia Prima

La teoría principal sobre la calidad de la pulpa esta relacionada con su comportamiento, como papel; esta calidad se evalúa principalmente en términos de resistencia, pero tambien se considera que brinda la fibra al papel. Así por ejemplo, en la actualidad, para muchos papeles de escritura e impresión, deja de ser requisito de primer orden la resistencia de la pulpa y, considerando el mínimo necesario, lo que se busca en el papel es suavidad, opacidad, blancura, textura, etc., propiedades estas que no siempre se encuentran en una pulpa de buena resistencia. Las evaluaciones de las materias primas se pueden hacer por biometría (aptitud papelera) como materia prima y por sus propiedades como pulpa.

4.6.1 Aptitud Papelera

Esta evaluación trata de determinar a través de las características anatómicas de las fibras, "apriori", la aptitud que tendría la especie al ser utilizada finalmente para la elaboración de papel. Las características a las que se refiere la evaluación de la aptitud papelera son las siguientes: dimensiones de las fibras (largo, ancho, lumen y espesor de pared), densidad lineal, y otros parámetros derivados. De alguna manera, estas características, en especial las de dimensiones, tienen mucha influencia sobre el comportamiento de la fibra en el papel; la habilidad que tiene la fibra para entrecruzarse y formar enlace no sólo dependerá de la lignina residual en la pared celular, sino también del largo, ancho y/o espesor de pared, y la forma como interactuen con otras fibras.

Al darle importancia a las dimensiones fibrilares, cabe agregar que existe una necesidad de establecer como se correlacionan estos parámetros con las propiedades de resistencia. Al respecto, se menciona que varios autores, por muchos años han dado importancia exclusiva al largo de la fibra lo que se relaciona con la facilidad de entrecruzamiento; sin embargo, varios investigadores han demostrado que en la elaboración del papel, la capacidad de formar enlaces es independiente de la longitud de la fibra, lo cual de alguna manera es corroborado por Paz (1986) y Bueno (1982, 1990). Este último autor demostró, con diversos trabajos de investigación de obtención de pulpa con madera de especies latifoliadas tropicales, que la resistencia promedio de muchas de ellas superan a los valores obtenidos de varias especies coníferas, tradicionales en la industria de pulpa. Entre las diferentes especies de latifoliadas evaluadas se puede mencionar al cetico (*Cecropia* spp.); huamansamana (*Jacaranda copaia*); bolaina (*Guazuma crinita*) y tangarana de altura (*Sclerolobium paniculata*); todas estas especies crecen en la región amazónica, típicas de bosques secundarios, destacando por su rápido crecimiento. Tal como se ya se a mencionado anteriormente, las dimensiones de fibras, varían dentro de rangos determinados, según la especie; cuadro 4.8.

Cuadro 4.8 : DIMENSIONES DE FIBRAS DE MADERA

Dimension De Fibra	Latifoliada	Conífera
largo **(L)** mm	0,8 - 2,0	3,0 - 6,0
ancho **(A)** um	15 - 40	25 - 45
espesor pared **(p)**	2 - 10 um	8 - 15
	ew: madera temprana	2 - 5 (ew)
	lw: madera tardía	6 - 10 (lw)
lumen **(a)**	Por la fórmula	a = A - 2p
Densidad lineal o *coarseness* **(cs)**	5 - 30 mg/100 m	15- 40 mg/100 m

Con las dimensiones anteriores se obtienen los siguientes índices:

Indice de Flexibilidad **(IF)** = a / A

Coeficiente de fieltrado **(CF)** = L / A

% de Pared $(\%p) = (2p / A) * 100$

Factor Runkel $(fR) = 2p / a$

Se puede encontrar relación de los índices mencionados con las propiedades de resistencia, tal como lo han comprobado diferentes investigaciones. La dimensión que mayor atención merece es la longitud, ya que de ella dependerá la habilidad de la fibra para entrecruzarse, pero, como ya se mencionó anteriormente, no es suficiente que se tenga una fibra de gran dimensión para tener calidad en la pulpa. Además de la longitud, la fibra debe tener capacidad para formar los enlaces, en especial del tipo puente de hidrógeno y las fuerzas de Van der Walls y esta cualidad dependerá de la reactividad de sus grupos en las cadenas de celulosa. Como se comprenderá, la disponibilidad de grupos reactivos es característica inherente a la composición química de la fibra y distribución de sus componentes en la pared, más no de la longitud fibrilar, lo que confirmaría la necesidad de considerar otros valores dimensionales para evaluar la aptitud papelera de una pulpa. Cabe destacar al valor dimensional de espesor de pared, por su relación con el aplastamiento de la fibra; cuando se aplasta este elemento, aumenta el área de contacto interfibrilar y por tanto aumentará la cantidad de enlaces (ver figura 4.6).

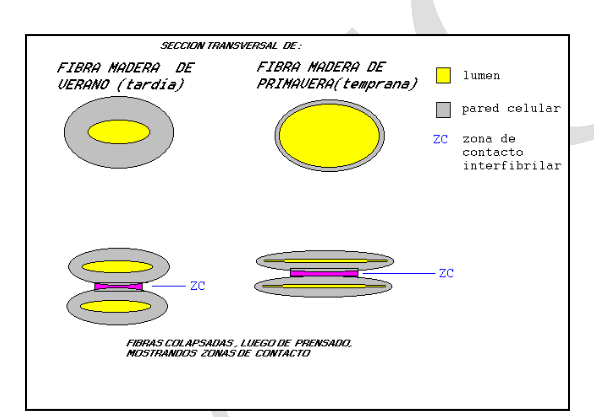


FIGURA 4.6 : Esquema, sección transversal, contacto entre Fibras.

De todos los indices antes mencionados, el que destaca es el factor de Runkel, considerado el más importante, ya que relaciona, en un sólo plano, el espesor de pared con el ancho de la fibra, determinando de manera indirecta el área que entrará en contacto con otras fibras, al aplastarse durante la formación del papel. De esta manera se puede relacionar al factor Runkel con la resistencia de las fibras; estableciendo rangos a los valores del índice, mostrados en el cuadro 4.9, se clasifican las materias primas por su aptitud para la fabricación del papel. La sección transversal de las fibras, a diferentes valores de Factor Runkel (FR) es mostrada en la figura 4.7.

CUADRO 4.9: Aptitud Papelera en Función de Factor Runkel

Factor Runkel	APTITUD PAPELERA
menor a 0,25	excelente
0,26 a 0,50	muy buena
0,51 a 1,00	buena
1,01 a 2,00	regular
mayor a 2,00	mala

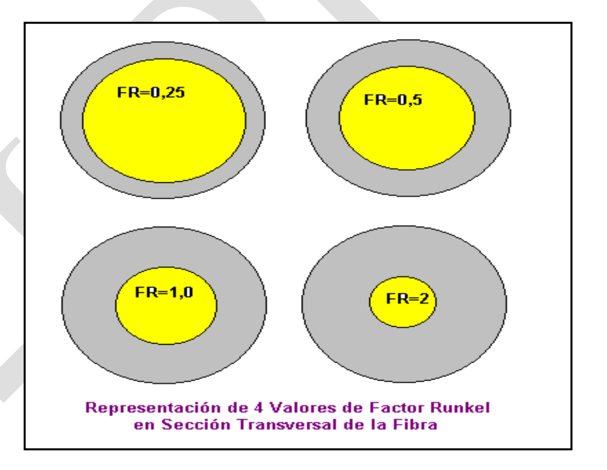


FIGURA 4.7 : Sección Transversal de Fibra, según Factor Runkel

La tabla anterior brinda información aproximada en la clasificación de las especies para pulpa; sin embargo tiene utilidad como información referencial, puesto que al final se deberá hacer la comprobación respectiva de las propiedades.

4.6.2 Evaluaciones en Pulpa

En la práctica, necesariamente deberá efectuarse las evaluaciones en pulpa para comprobar la aptitud papelera de una materia prima. Antes de procesarlas a nivel industrial, las pulpas deben ser obtenidas en laboratorios y/o en plantas piloto y luego ser evaluadas conforme a su uso final. Las evaluaciones se pueden clasificar en:

4.6.2.1 Evaluaciones de Resistencia

Resistencia a la tensión,

Evalúa la carga máxima de ruptura que soporta una hoja de papel; tiene utilidad en todo tipo de pulpa para papeles y cartones. Se expresa mediante el

índice de tensión (kN/m) o longitud rotura (m); en longitud de rotura, valores comunes van entre 2000 a 10000 m .

Alargamiento por tensión

Mide el incremento en longitud de una hoja, al esfuerzo máximo de ruptura. Se expresa en porcentaje (%);

Resistencia al rasgado

Determina el trabajo necesario para rasgar o "romper" una juntura de la hoja; junto con la r. a la tensión, se les considera como las pruebas de resistencia más importantes. Se expresa como el Indice de rasgado con valores entre 4 a 20 $mN.m^2/g$;

R. al reventamiento

O prueba *Mullen*, mide la presión máxima que soporta una hoja en una de sus caras. Suele ser expresado mediante el factor de reventamiento, con valores entre 2 a 8 $kPa.m^2/g$.

Dobles pliegues

Corresponde al número máximo de pliegues que soporta una hoja. Se puede expresar en forma simple como el número de pliegues (#) o tambien como su valor logarítmico (Lg #);

Resistencia al aplastamiento

Evalúa la resistencia máxima que soporta una hoja ondulada en una de sus caras. Su determinación es útil en pulpas para elaborar cartones corrugados. Un método de evaluación conocido es el *Concora Medium Test* CMT, y el resultado se expresa en Newton (N).

4.6.2.2 Evaluaciones Físicas

Espesor

Medida con un micrómetro, sus valores estan influenciados por la rigidez de la fibra y la capacidad de entrecruzamiento. Se expresa en mm o en micras.

Densidad

Al igual que la propiedad anterior, depende de la rigidez de la fibra. Se expresa en kg/m^3.

Blancura

Parámetro por la lignina y otros compuestos cromógenos en la pulpa. La blancura se evalúa en términos de reflexión de una luz (azul de 456 nm). Existen diferentes equipos para su evaluación, destacando las unidades en que se expresan sus resultados : °Elrepho, °Photovolt, °GE ; valores comunes de pulpa sin blanquear van entre 12 a 30 ºGE y en pulpa blanqueada, de 60-95 ªGE.

Opacidad

Evalúa el grado de traslucidez de la hoja y es importante en pulpas para papeles de impresión. Se expresa en valores porcentuales (%).

Permeabilidad al aire

mide el flujo de un fluído a través de la hoja y su resultado depende del tipo de pulpa, aunque tambien va a depender del acabado superficial en el producto final. Se expresa como velocidad del aire a una presión constante (um/s.Pa).

4.6.2.3 Evaluaciones Químicas

α Celulosa

Es la fracción más estable, otorga el caracter cristalino a la celulosa de la pulpa; la cantidad de este componente esta en relación directa con las propiedades de resistencia de la pulpa. Las otras fracciones, beta y gamma, son menos estables y se solubilizan fácilmente en medio alcalino. La α celulosa se expresa en forma porcentual (%) ;

Grado de polimerización

Es el número de monómeros de anhidroglucosa que conforma una cadena de celulosa. Al igual que el análisis anterior, sus valores (entre 250 a 1000 u) estan en relación directa con la resistencia.

Lignina residual

Corresponde al análisis de este componente, remanente en la pulpa. Su presencia, aún en pequeñas cantidades, afecta todas las propiedades de las fibras; sus valores varian entre 2 a 6 % (en pulpas químicas) a más de 10 % en pulpas semiquímicas y mecánicas.

Índice Kappa

Determina en forma indirecta la lignina residual mediante una reacción de oxidación con permanganato de potasio ($KMnO_4$). Es de aplicación rápida y es muy utilizado en la industria; sus valores indican el grado de deslignificación (menos de 50 en p. químicas) y su aptitud al blanqueo (menos de 20).

Demanda de cloro

Define la cantidad necesaria (g) de un blanqueador (cloro o su equivalente) necesario para el tratamiento de 100 g de pulpa (bms). Tiene la ventaja de ser de aplicación directa para formulaciones de blanqueo en la industria, aunque sus valores tienen una correlación con el índice de kappa.

Hemicelulosas

Componente cuya presencia es importante para el tipo pentosanos; este último de caracter altamente hidrofílico, favorece las operaciones de refinado de las pulpas durante la preparación de pasta para papel. En el caso de pulpas para disolver, se debe eliminar todo tipo de hemicelulosas, por lo que las condiciones del proceso de pulpeo requieren de condiciones para degradar y solubilizar las hemicelulosas.

4.7 MADERA PARA PULPA

En la industria de pulpa de madera, la

transformación óptima de la materia prima hasta producto final se logra mediante la aplicación de una serie de etapas sucesivas, efectuadas en forma ordenada, de acuerdo al tipo de pulpa a fabricar. La efectividad de las operaciones y/o procesos influirán en la calidad de la pulpa, productividad y de su costo de producción. Cabe resaltar la ruta de preparación de la madera dentro de la industria de pulpa celulósica que se simplifica en las siguientes etapas de la figura 01. Dada la importancia de la madera sobre la calidad y costos de producción (40 a 60 %) de la pulpa, es que se deben tomar en cuenta algunas especificaciones, con el fin de mantener un standard óptimo del producto elaborado.

4.7.1 Especificaciones De Madera

a) Madera En Trozas

La mayoría de las plantas de pulpa reciben la madera en troza y de ahí posteriormente es astillada, según lo requiera el método utilizado. Sin embargo, sólo en el proceso mecánico de piedra se utiliza la madera en troza.



FIGURA 4.8: Camión con madera de pino

El diámetro promedio es 0,2 m (s/c); el largo de la troza es equivalente al ancho de la piedra de desfibrado y varía entre 0,8 a 1,4 m (la madera que entra a planta puede tener una dimensión en 2-3 veces su longitud). Las características generales de las trozas que llegan a la planta de pulpa deben ser las siguientes:

- tener mínimo 30 % humedad (bmh) lo que facilita el descortezado y/o astillado;
- Con dimensiones largo del rollizo entre 2 a 3 m; el diámetro entre 0,15 a 0,35 m, sin corteza (aunque tambien se procesa trozas hasta de 0,4 m de diametro promedio).



FIGURA 4.9: Patio de madera

b) Astillas

Es la principal forma de consumo de la madera en las fábricas de pulpa, tanto en los procesos químicos, asi como tambien en los p. mixtos y mecánicos que utilizen desfibrador de discos. Las dimensiones promedio de las astillas varían entre los siguientes rangos:

- 30 a 70 mm , para el largo (sentido longitudinal);
- 10 a 30 mm , para el ancho;
- 3 a 9 mm , para el espesor;

Las astillas deben presentar en los extremos (sentido transversal) un ángulo de corte de 45°-50°, respecto al eje perpendicular; la mayor área transversal obtenida facilita la penetración de los fluídos, agua y reactivos. Las astillas son obtenidas en fábrica, pero tambien existe la compra de "chips" a terceros.

4.7.2 Etapas de Fabricación de Pulpa con Madera

(a) Descortezado: Descortezador de cilindro

Es el método más utilizado en la industria de pulpa por su capacidad y alta productividad para el descortezado; el tratamiento se aplica para varias trozas tratadas en grupos. El principio de descortezado se basa en la fricción o frote debido al choque de las trozas; estas ingresan al tambor que tiene una velocidad angular de 1 a 12 rpm; este movimiento imprime de energía cinetica al tronco, que luego se transforma en energía de presión (de impacto) necesaria para que se produzca el

descortezado. Los diámetros del tambor van de 3 a 5 m y la longitud entre 20 a 50 m. La potencia instalada de los equipos varia de 130 a 500 kW; las capacidades de producción estan entre 30 a 400 m3 de volumen sólido, con una eficiencia media de descortezado del 90 por ciento; las pérdidas de madera son del orden de 4 a 5 por ciento. (ver figura Nº).

(b) Astillado

La madera debe encontrarse en una dimensión adecuada, facilitando las reacciones químicas y de desfibrado; las dimensiones óptimas de las astillas (mencionadas en 4.7.1.b) facilita la aplicación de la energía y la penetración del licor de cocción y por tanto la velocidad de reacción se ve favorecida. En la madera, la mayor velocidad de penetración de un fluído se da, através la sección transversal, con dirección longitudinal, en el sentido de loas elementos conductores en árbol; en la dirección contraria (perpendicular al eje) la velocidad es menor, haciendo por tanto que el espesor de la astilla sea considerado un valor crítico durante el pulpeo. Se debe tener en cuenta que el tiempo óptimo en un proceso químico esta en función del espesor de la astillas; espesores mayores al promedio óptimo retardaran el ingreso de los reactivos, aumentando la cantidad de incocidos (madera no desfibrada) al final del tratamiento.



FIGURA 4.10:Astilladora de discos

Para esta operación se utiliza el astillador de discos, equipo utilizado, por su versatilidad y calidad de astilla para pulpa (ver figura Nº 4.10).

Luego del astillado, se obtiene diferentes dimensiones en las astillas, siendo necesario una clasificación; para tal efecto se utiliza un tamiz o zaranda vibratoria, que clasifica en tres fracciones:

-fracción sobredimensionada, con astillas de dimensiones mayores al promedio; esta fracción va al **reastillado;**

-fracción aceptada, con dimensiones dentro del rango normal, va a zona de almacenamiento;

-fracción fina, de dimensiones menores al promedio; sin utilidad para pulpa, se emplea como combustible en caldero.

b.1 Reastillado

De fracción sobredimensionada; se utilizan astilladoras de tambor o martillo.



FIGURA 4.11:Patio de astillas

V. PULPAS QUIMICAS

En todo proceso de pulpeo químico se busca una separación fibrilar al eliminar el factor cohesión que da la lignina, mediante un debilitamiento de sus enlaces; la separación de las fibras se da por la solubilización de la lignina de la lámina media que actúa como ligante natural .

La historia de las pulpas químicas se inicia en 1800 cuando Koops trabaja en medio alcalino (soda cáustica) para deslignificar paja, de bajo porcentaje de lignina (16 %). En 1851 Burguess y Watt trabajan con madera (abedul) en Inglaterra. Posteriormente en 1857 aparece el proceso al sulfito, el cual gana vigencia entre 1874 a 1881, frente al proceso a la soda. Las ventajas manifestadas hasta entonces de las pulpas al sulfito fueron; pulpas más claras, reactivos de menor costo y mayor resistencia de las pulpas

Pero el desarrollo de la técnica de electrólisis abarata el costo de producción del hidróxido de sodio, lo que hace que el método alcalino vuelva a tener vigencia.

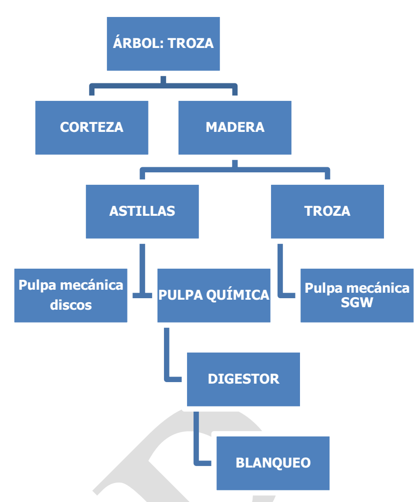
En 1879, en Danzing-Alemania, Dahl utiliza el sulfato de sodio en lugar del carbonato de sodio, patentando el método en 1884. La ventaja de este método se demuestra en 1885, en Jönkoping - Suecia, cuando por error, al descargar unas astillas aún incocidas, son pasadas por un desfibrador , obteniéndose una pulpa de color oscuro, pero de gran resistencia dándosele el nombre de pulpa "kraft" que significa fuerte, en alusión a la resistencia de la pulpa. En la actualidad hay vigencia del proceso al sulfato o "kraft" predomina sobre los demás procesos químicos, aunque el sulfuro de sodio esta siendo reemplazado por aditivos (antraquinona).

Las pulpas químicas presentan alto contenido de celulosa y hemicelulosas, pero bajo en lignina; son fáciles de blanquear y suceptibles de ser refinadas con facilidad. Las pulpas químicas otorgan, al papel, resistencia, blancura, densidad, modifican su permeabilidad y suavidad.

5.1 Influencia de las Materias Primas

5.1.1 Características Físicas

Las materias primas para la industria de pulpa presentan características fisicas que influyen sobre la



reactividad durante el proceso, siendo la más importante la densidad. En el caso de madera, hay una relación directa entre su densidad y el tiempo de cocción; maderas de baja densidad son más permeables, facilitando la penetración de los reactivos, ocurriendo lo contrario en maderas de mayor densidad. Sin embargo, la mayor densidad favorece la productividad en la fábrica, ya que, para un mismo volumen, hay mayor masa de materia reactante. En general, para la industria de pulpa se aceptan especies cuyas maderas tengan una densidad entre 0,4 a 0,6 g/cm3 de densidad básica.

5.1.2 Características Anatómicas

En maderas es alta la proporción de fibras, respecto a los demás componentes y representa más del 80 por ciento , en fracción másica, en la mayoria de las especies. En sección transversal, respecto al volumen, a las fibras le corresponde de 65 a 90 por ciento en latifoliadas, y de 90 a 95 por ciento en coníferas (Navarro-1976).

5.1.2.1 Dimensiones de las Fibras

Con la evaluación de las dimensiones de las fibras, se puede predecir la calidad de la pulpa química. Aunque el concepto predominante ha sido por muchos años considerar el largo de las fibras como la dimensión que más influye sobre las propiedades de resistencia, investigaciones posteriores han demostrado que esta teoría no siempre se cumple; asi, se obtuvo en estudios con maderas latifoliadas, pulpas químicas con valores de resistencia muy superiores a las obtenidas con especies coníferas tradicionales en la industria papelera, como es el caso de los eucaliptos (*Eucalyptus globulus* y E. *saligna*), *Gmelina arborea*, la bolaina (*Guazuma crinita*), huamansamana (*Jacaranda copaia*), tangarana de altura (*Sclerolobium paniculata*) y cetico (*Cecropia* spp.) , las 4 últimas especies tropicales peruanas.

Mayormente se estiman factores o índice, calculados a partir de las dimensiones de las fibras, para poder predecir la calidad o propiedades de resistencia :

Indice de flexibilidad, se relaciona con resistencia a la tensión,
Indice de mezcla o Coeficiente de fieltrado, se relaciona con resistencia al rasgado
Factor Runkel,se relaciona con la calidad papelera (ver punto 4.6.1).

5.1.2.2 Presencia de Parénquima

Aunque no es un componente abundante en madera, se le describe como un tejido no especializado conformado por células cúbicas o isodiamétricas, pequeñas , a veces alargadas, de paredes delgadas sin membrana secundaria, conservando su núcleo. En la planta cumplen una función de reserva (almacén de almidón o agua). Este tipo de células no tiene cualidades papeleras las que se destruyen por las condiciones enérgicas de las cocciones químicas.

5.1.2.3 Presencia de Vasos

Se encuentran sólo en las maderas de latifoliadas, esta conformado por una superposición de células tubulares, cortas de extremos abiertos; lass células qwue lo conforman , al llegar a su madurez desaparece el protoplasto, rompiéndose la pared primaria en los extremos, formándose una estructura tubular de gran longitud (Wilson-Loomis). Presentan punteaduras en sus paredes laterales, lo que permite la identificación de la especie. En general, la estructura del vaso se destruye, pero permanecen las células sueltas y su presencia en una masa de pulpa o papel permite identificar a la especie utilizada en el pulpeo.

5.1.3 La Composicion Quimica

Influencia de Celulosa

Es el componente químico deseado, se presenta bajo una forma lineal y cristalina, en conjunto va formando en forma sucesiva a los cristalitos, microfibrillas, fibrillas y pared celular de la fibra. Las condición de cocción química buscan una mínima degradación de este componente. La evaluación de la calidad de la pulpa o celulosa se hace através de su grado de polimerización, siendo de mayor interés la ∞ celulosa que corresponde a la porción más estable, aparentemente se disuelve la mayor cantidad de la ß y τ celulosa (según la definición en el ánalisis respectivo). El contenido de celulosa (∞ celulosa) en la madera esta en relación directa con el rendimiento de pulpeo químico; los valores de celulosa en madera varian entre 35 a 45 por ciento.

Influencia de Hemicelulosas

Es una fracción de carbohidratos fácilmente atacado por ácidos minerales y álcalis diluídos; forma una matriz estructural asociada con la celulosa y lignina, por lo que su reactividad depende de su distribución en la estructura fibrilar. Generalmente se disuelve la mayor parte durante el pulpeo químico, siendo la disolución mayor en medio alcalino que en medio ácido; esto explicaria el mayor rendimiento en pulpas al sullfito comparados con los obtenidos en pulpeos alcalinos. Las hemicelulosas permanecen en las pulpas químicas, y son suceptibles a la fotodegradación y oxidación, lo que causa cambios de color y amarillamiento en los papeles blancos, a pesar de la ausencia de lignina.

Influencia de Lignina

Es el material incrustante en las plantas y cumple con la función de dar cohesión a las fibras en la madera; su unidad básica es el fenil propano y los grupos reactivos son hidroxilos y metoxilos. En latifoliadas se encuentra en un promedio de 20 por ciento (rango 18 a 25 %) y hay una mayor proporción de los grupos metoxilos, lo que favorece su reactividad; en coníferas el promedio de lignina es de 30 por ciento (rango 23 a 32 %) y hay menor proporción de grupos metoxilos. Asimismo, varios autores coinciden en una diferencia en la lignina de la lámina media y la de pared fibrilar, siendo la primera en reaccionar durante el pulpeo (concepto de reacción topoquímica). Sin embargo la presencia de grupos metoxilos modifica la reactividad en la capa, presentando una relación directa con los grupos mencionados. En el caso de latifoliadas, la lámina media presenta mayor cantidad de lignina y además por los grupos metoxilos, es más reactiva. El contenido de lignina en la madera esta en relación directa con el tiempo de cocción, la temperatura y la cantidad de reactivos empleados en la cocción.

Influencia de Extractivos

Corresponde a la porción extraíble de la madera; están conformados principalmente por resinas, ácidos grasos, ceras, taninos, aceites esenciales, etc. La mayoría de los extractivos solubilizan por efecto de la temperatura y/o el medio alcalino de reacción, lo que explica la versatilidad de los procesos alcalinos para trabajar con cualquier materia prima lignocelulósica. En medio ácido, (procesos al sulfito) la solubilidad de los

extractivos es baja; con especies de alto contenido de resinas (ácidos resínicos de coníferas), se forma el "pitch" luego del pulpeo, que corresponde a las resinas precipitadas sobre las fibras como extractivos insolubilizados. Este problema persiste luego del blanqueo y disminuye la calidad del papel.

En general, especies con alto contenido de extractivos dan rendimientos menores; se entiende que durante el pulpeo químico, la fracción de extractivos, se solubiliza fácilmente.

Influencia del Sílice

El óxido de silicio (SiO2) o sílice es un mineral indeseado en la madera debido a su efecto abrasivo sobre los elementos de corte utilizados en la preparación de la materia prima; existen especies madereras que se descartan para el pulpeo por su alto contenido, relativo, de sílice ((> 0,5 %). Con residuos agrícolas se aceptan valores de 2 a 4 % (bagazo de caña de azúcar)
.

Los procesos alcalinos no presentan problemas durante la cocción con especies abrasivas; sin embargo en la etapa de recuperación de reactivos, la formación de silicatos dificultan la evaporación de las lejías ,obstruyen las tuberías, y forman lechos que dificultan la transferencia de calor en la cámara de combustión. En la actualidad, fábricas de pulpas químicas con residuos agrícolas (bagazo en Paramonga y Santiago de CaO) efectuan cocciones a la soda, donde no se practica la recuperación de reactivos..

5.3 Fabricacion De Pulpa Química

Se utiliza astillas o "chips" ; las fibras se separan por disolución química de la lámina media, eliminando la cohesión fibrilar. La acción de los reactivos utilizados depende de su velocidad de reacción que a su vez esta en relación con los demás parámetros del proceso. Las reacciones químicas ocurren dentro de un reactor, denominado comúnmente digestor.

5.3.1 Digestores

Los equipos para la cocción se utilizan de acuerdo al flujo de la planta, a la capacidad de producción y al tipo de materia procesada. Durante la cocción, se distingue los tiempos o períodos de (i) carga de materia prima al digestor, (ii) t. de cocción propiamente dicha y por último (iii) el t. de descarga de la pulpa..

(a) Digestor Vertical Discontinuo

Tambien llamados d. batch; la denominación se debe a la diferencia de todos los tiempos de carga, cocción y descarga. Son equipos estacionarios y de capacidad efectiva de 100 a 225 m^3 y producciones diarias entre 15 a 200 t de pulpa ; la altura de los equipos va de 7 a 15 m. Para mantener la temperatura de cocción, cuenta con un sistema de intercambiador de calor, que calienta la lejía de cocción extraida y devuelta al digestor en forma sucesiva durante el proceso. La pulpa obtenida es descargada, junto con la lejía negra, al tanque de soplado (blow tank), de donde posteriormente se llevará a la etapa de lavado.

(b) Digestor Continuo

La carga, cocción y descarga se hace en forma simultánea; son equipos de gran capacidad pero poco versátiles. Antes de que ingrese la materia prima al digestor, pasa por un pre-impregnador con vapor, para luego dirigirse hasta la válvula automática de carga.



FIGURA 5.2: digestor vertical, para madera

Son de forma vertical, adecuados para el trabajo con madera; presentan alturas de 30-50 m. Los digestores modelo Kamyr incluye la etapa de lavado en el equipo.Es un sistema muy utilizado por su gran capacidad de producción, que varia de 500-2000 t/día de pulpa.

El digestor, en forma horizontal, por su forma y posición, son adecuados para procesar plantas anuales y residuos agrícolas.El sistema de avance de la materia es con un tornillo sinfin ubicado dentro del equipo.

5.3.2 Variables de Tratamiento Químico

El grado de deslignificación en una madera de muchos factores a mencionar, inherentes a:

- la especie
- la composición de los reactivos
- control del proceso (presión, temperatura, ciclo de cocción, factor H, cantidad de reactivo, relación licor/madera.

Temperatura

Variable entre 160 a 180 ºC (433 a 453 ºK). El calentamiento en el digestor es mediante la inyección de vapor;

Presión

6-10 kg/cm2 (588-980 MPa): presión equivalente a la temperatura de vapor de cocción;

Tiempo

O períodos de tratamiento, se consideran dos valores:

- **t. de elevación de temperatura,** depende del grado de difusión de los reactivos dentro de la materia prima; este valor es menor a los 30 minutos en procesos alcalinos;
- **t. de cocción,** a la temperatura máxima, depende de la energía de activación de los reactivos químicos sobre la lignina; este valor varía de 30 a 180 minutos.

Relación Licor/madera

Relación ponderal masa/masa, se aplica como control para la dilución de reactivos y favorecer su difusión a la materia prima. Los valores industriales varían de 3/1 a 5/1.

Factor H

Parámetro que involucra tiempo y temperatura de cocción, mide la energía de reacción durante el proceso. Es un método desarrollado por Vroom (1957), basado en la ecuación de Arrhenius, donde la velocidad de reacción (k) esta en función de la temperatura absoluta. El valor de k se obtiene mediante la ecuación De Hartkopf y Wilson; involucra a la velocidad relativa de deslignificación; se define como el area bajo la curva que hay en una distribución tiempo (T)-velocidad de reacción (K).

La velocidad de descomposición de la lignina se representa por la ecuación[7]:

$dL/dt = k(L-L_D) = kL-kL_D \approx kL_1 - k_2$

$\int [1/(L-L_D)]dL = \int k(dt)$

$Ln[L-L_D] = kt$

$e^{kt} = L-L_{D;}$ $kt = Ln[L-L_D]$

Se asume arbitrariamente que la velocidad de reacción a 100º C es 1 (ver figura 5.3). La velocidad de reacción se estima para cada instante de temperatura durante el período de cocción, según la fórmula propuesta por Vroom, basada en la ecuación de Arrhenius:

$$\mathbf{K = Ln^{-1} [B - (A/T)]}$$

$\mathbf{A = E/R}$

donde
K: velocidad de reacción
B: constante de Maass
B= 43,2 (pulpa kraft), cuando k=1 a 100 °C (373 °K)
R: cte. universal de gases R=1,987 g-cal/(g-mol*°K)
E: energía de activación para la deslignificación;
E = 32000 cal/mol, proceso químico kraft, calculado con una conífera
T: temperatura absoluta en el digestor, en °K

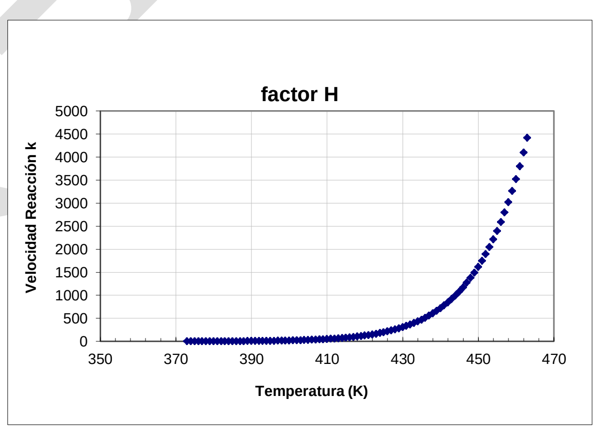


FIGURA 5.3: Variación de Velocidad de Reacción en Función de Temperatura

Para el proceso kraft, el valor K se determina mediante la siguiente ecuación:

$K = Ln^{-1} [43,2 - (16113/ T)]$

Luego, para obtener el factor H, se sigue el modelo de Vroom, aplicando integración por partes, donde el factor H se calcula de la siguiente manera:

$\mathbf{factor\ H = \Sigma^{t\ max}[(K_{t1,t2} * \theta_{t1,t2}) + (K_{t\ max} * \theta_{t\ max})]}$

donde
$\mathbf{K_{t1,t2}}$: velocidad de reacción promedio entre 2

temperaturas t1 y t2

$\theta_{t1,t2}$: intervalo de tiempo, en horas, entre 2 valores de temperatura t1 y t2

$K_{t\ max}$: velocidad de reacción a la temperatura máxima

$\theta_{t\ max}$: tiempo, en horas a la temperatura máxima max

Para la sumatoria se calculan los valores a partir de los 100 °C (373 °K)

En el proceso al sulfato, se requiere un factor H entre 750 a 1500, que depende de la materia prima utilizada, del grado de deslignificación o número de kappa requerido. Un ejemplo de representación de la variación del factor H (factor H=1230) en función de la temperatura se muestra en la figura 5.4.

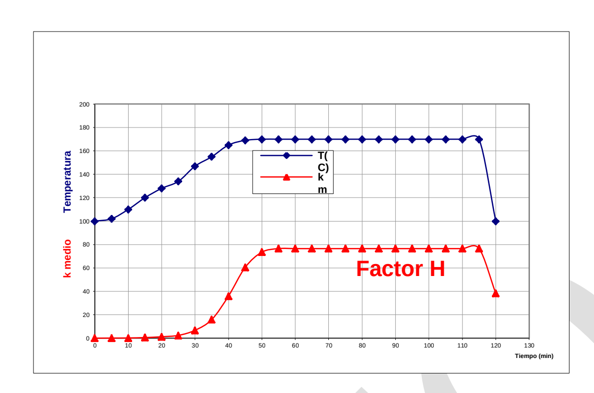


FIGURA 5.4: Variación de Factor H en función del Tiempo de Cocción en un proceso Kraft (factor H=1230).

Factor Tau

Otro método que involucra la cantidad de reactivos, que no sucede con el método de Vroom, es el de Edwards y Norberg, que proponen el modelo del factor τ para el proceso kraft ,estimado de la siguiente manera:

$$\text{factor } \tau = [S / (2-S)]*[AE / (L:M)] * (\text{factor H})$$

S : sulfidez , en fracción decimal
AE : alcali efectivo en %
L:M : relación licor: materia seca

5.3.3 Reactivos

Un reactivo es un compuesto agregado al medio de reacción (reactor) donde actua sobre el reactante, formando uno o mas productos de reacción; al final de la misma hay un consumo o agotamiento del reactivo. En los procesos químicos de pulpeo, los reactivos utilizados cumplen ciertas condiciones :

- selectividad sobre la fracción no sacarídica, es decir las reacciones de cocción se efectuan preferentemente con los grupos reactivos de la estructura de la lignina y otros componentes diferentes a la holocelulosa;
- mantiene sus condiciones de reacción a la temperatura máxima y/o durante todo el tiempo de cocción, concentración adecuada de grupos reactivos y el pH del medio;
- son de costo bajo de adquisición y/o generación;
- tienen factibilidad económica en su recuperación, luego de la cocción;
- no tienen efecto residual sobre la pulpa y en su uso final;
- son de fácil manipulación, no tóxicos ni corrosivos, a condiciones normales;

En la actualidad, hay tres tipos de reactivos utilizados en la industria de pulpas químicas:

- reactivos alcalinos: hidróxido de sodio, sulfuro de sodio
- Sulfitos: bisulfitos ,sulfitos
- reactivos orgánicos: etanol, metanol

Los reactivos con pH alcalino provoca un hinchamiento de la materia prima, solubilización de las fracciones de ß y τ celulosa, asi como las reacciones de "peeling" y "stopping"; en las hemicelulosas hay solubilización de hemicelulosas; en la lignina causa hidrólisis y solubilización.

5.3.3.1 Catalizadores

Según Droguett (1983) el catalizador es una sustancia que aumenta la velocidad de reacción y permanece sin alterarse químicamente; participa activamente en la transformación química e incluso, en algunas reacciones desempeña la acción de intermediario entre reactivos y productos. El catalizador presenta tres propiedades importantes, en cocciones químicas:

- actividad, aumenta la velocidad de cocción;
- selectividad, favorece la acción deslignificante, con una menor alteración de los carbohidratos;
- estabilidad, durante el tiempo de reacción, manteniendo inalterable las dos propiedades anteriores.

Las ventajas en los procesos de pulpeo son la mayor

productividad y mejor calidad de pulpa. Un catalizador muy importante es la antraquinona.

5.3.4 Teoria de la Deslignificacion

La deslignificación se lleva a cabo por el hecho de haber diferencia entre las propiedades químicas entre la lignina y los demás componentes químicos de las fibras (holocelulosa); en otras palabras entre los componentes fenólicos y sacarídicos de la madera. Según Rydholm (1967) en la remoción de la lignina, esta pierde su estructura original. Con la deslignificación se busca vencer las fuerzas adhesivas poliméricas que existen entre la lignina y los carbohidratos. La deslignificación óptima se da cuando se llega a la completa liberación de las fibras; al respecto se denomina **punto de liberación de las fibras** al punto límite entre las pulpas químicas y las de procesos mixtos, corresponde al estado en que las fibras comienzan a separarse sin necesidad de energía mecánica, característica que varía con la especie y métodos de obtención de pulpa química; se entiende que en los procesos químicos, la separación de las fibras se logra exclusivamente por el empleo de energía química, o cantidad de reactivos de cocción, bajo condiciones específicas de tiempo y temperatura. La liberación de las fibras se activa cuando la mayor parte de la lignina de la lámina media ha sido disuelta.

Entre la madera de latifoliadas y coníferas hay diferencias en la deslignificación debido a su estructura química y distribución de la lignina en las fibras; así, Whiting y Goring, demuestran que las reacciones de deslignificación se da con mayor rapidez donde existen mayor cantidad de grupos metoxilos de la lignina; en coníferas los metoxilos se concentran en la pared secundaria y por tanto la remoción de lignina es menor en la lámina media, lo que se contrapone a la definición de las reacciones topoquímicas; esta teoría explica porqué se requiere mayor tiempo y energía de cocción para llegar al punto de liberación fibrilar. Las maderas de latifoliadas presentan mayor cantidad de grupos metoxilos, que se concentran en la lámina media, por consiguiente son más reactivas en el pulpeo, siendo mucho más rápida y eficiente la deslignificación, comparadas con las coníferas.

5.3.4.1 Cinética de la Reacción de Deslignificación

Se define a la cinética química como la parte de la físico - química que estudia la velocidad de las reacciones y proporciona información sobre el mecanismo de transformación de los reactantes (reactivos y materia prima) a productos (pulpa). La velocidad de reacción va a depender de los reactivos químicos y su concentración, tipo de materia prima y temperatura; así por ejm, el aumento de la velocidad puede duplicar o multiplicar aún más la velocidad de reacción (ver tasbla de factor H). Con la concentración hay una aceleración de la velocidad que es máxima al inicio (concentración alta) y disminuye a medida que se van consumiendo los reactivos

Las reacciones de pulpeo se clasifican como reacciones heterogéneas debido hay varias fases dentro de la reacción (interactuan los estados sólido, líquido y gas); asimismo la complejidad química de la materia prima hace díficil aislar la reacción en una ecuación diferencial, aunque , en forma práctica, generalmente se puede aplicar las ecuaciones de primer orden para cada componente químico de la madera.

5.3.4.2 Ecuaciones Empíricas

Observando resultados experimentales de rendimientos en pulpeo químico con el tiempo de cocción , se encuentra una relación inversa de forma logarítmica. Al respecto, se puede aplicar la ecuación de Zill[8] propuesta para reacciones de desintegración donde:

$$\lim (\delta X/\delta t) \quad \text{cuando } \delta t \to 0$$

siendo δX : cantidad de masa (madera, holocelulosa o lignina) que se descompone o disuelve por cada variación δt

δt : variación correspondiente al tiempo o algún otro parámetro que lo involucre (factor H o tau)

El modelo matemático queda como sigue:

$$dx/dt = - kX$$

siendo $k > 0$ constante de proporcionalidad

de la resolución de la ecuación queda

$$X_t = X_o * e^{-k\,t}$$

X_t : cantidad de masa disuelta al tiempo t

X_o : cantidad inicial de masa cuando $t = 0$

este modelo matemático es aplicable a la predicción de rendimiento en función del tiempo (factor H o tau) manteniendo las demás variables constantes. Se puede hacer estimaciones de rendimientos u otro resultado deseado a partir de diversos parámetros, siempre y cuando se haga el mejor análisis de los resultados experimentales.

5.3.5 Pulpa Quimica Al Sulfato

La pulpa al sulfato o pulpa "kraft" es aquella obtenida en el proceso respectivo y se caracteriza por su alta resistencia.

5.3.5.1 Ventajas y Desventajas del proceso

Las ventajas de la pulpa y el proceso son:

- la pulpa es de alta resistencia y se le utiliza, sin blanquear o blanqueada, en la fabricación de todo tipo de papel
- el proceso es muy versatil con la materia prima; la condición alcalina en caliente permite que se trabaje con cualquier tipo de material lignocelulósico, ya sean maderas de alta o baja densidad, con alto porcentaje de extractivos, tolerancia de corteza, residuos agrícolas, etc.
- el proceso es de menor tiempo y temperatura, comparado con los métodos a la soda y al sulfito, lo que permite un aumento de productividad.
- el proceso presenta la factibilidad de recuperación de reactivos, con los consiguientes beneficios económicos y de control de contaminación.
- trabajando con coníferas, se recupera el "tall oil" o sulfato de trementina, como subproducto, de mucha importancia económica.

Las desventajas son las siguientes:

- Se requiere una gran inversión y economía de escala en siu producción;
- Suelen ser pulpas oscuras, con problemas en el blanqueo.

5.3.5.2 Reactivos del proceso: Terminología

Los reactivos del proceso son el hidróxido de sodio y el sulfuro de sodio; En general los reactivos utilizados en los procesos alcalinos (NaOH y/o Na_2S) van mezclados en el licor de entrada (lejía blanca) junto con otros componentes (Na_2CO3, tiosulfatos,etc.).

Para indicar los valores de aplicación de reactivo o índices de recuperación, se adopta una terminología, empleando como común denominador el óxido de sodio; se emplean términos de expresión de reactivos, para caracterizar el proceso:

Alcali activo (AA) $= NaOH + Na_2S$

Alcali efectivo (AE) $= NaOH + ½ Na_2S$

Sulfidez (% S) $=[(Na_2S/(AA)] * 100$

La lejía blanca utilizada en la industria proviene de la planta de recuperación y presenta valores iniciales de álcali activo (Na_2O) de alrededor 100 g/L, la que luego es diluída a valores de 25-60 g/L (promedio 50 g/L) para la cocción. En reemplazo del Na_2S se utiliza el azufre, de menor costo, en un sistema denominado kraft modificado. El azufre reacciona durante la cocción, formando hidrosulfuros, que reaccionan con la lignina.

En la práctica, de acuerdo al tipo de madera, el álcali activo aplicado varía entre 16 a 24 % (bms, como óxido de sodio), variando en relación directa con la densidad y/o el contenido de lignina; con residuos agrícolas, el valor de AA va de 12 a 16 por ciento. Tambien se define la cantidad de reactivo de acuerdo al grado de deslignificación deseado; así para pulpas a ser blanqueadas, donde se requiere un kappa bajo (15 a 25), se requerirá un álcali activo relativamente alto. Con relación a la sulfidez, los valores comunes estan entre 20 a 26 por ciento.

5.3.5.3 Aditivos:Antraquinona

El aditivo más común es la antraquinona que es descrito por Noller, como un sólido cristalino y amarillento, que funde entre 284 a 382 °C, que se disuelve fácilmente en solventes orgánicos. Su fórmula general es $C_{14}H_8O_2$ (Pm=208,20). Su función más importante en la cocción es la estabilización de los carbohidratos, disminuyendo su degradación, con los consiguientes beneficios en rendimiento. Se aplica en la cocción en cantidades que van del 0,05 a 0,1 % (bms) .

5.3.5.4 Temperatura, Tiempo y Factor H

Con relación a la temperatura, en el proceso al sulfato, sus valores van de 160 a 175 °C, y los tiempos, entre 2 a 3,5 horas. El factor H oscila entre 800 a 1500 u. La diferencia entre los valores mencionados dependerá del tipo de materia prima a procesar y de la calidad de la pulpa deseada. Así para maderas de alta densidad las condiciones de tiempo y temperatura serán altas, teniendo el mismo requerimiento las pulpas para blanquear, con bajo valor de kappa.

Casey[9] (1988) propone una ecuación de rendimiento (R) de pulpa en función del factor H (H) y del álcali efectivo (AE):

$$R = A - B\, Lg_{10}H*(AE)^n$$

A,B,n: constantes

5.3.5.5 Reacciones de Componentes Químicos

En los procesos alcalinos, el pH elevado de los reactivos favorece el hinchamiento de la materia prima y su posterior deslignificación. En el proceso kraft, la presencia del sulfuro de sodio es importante ya que cataliza la reacción y su acción es selectiva sobre la lignina. El sulfuro de sodio se disocia en agua:

$Na_2S + H_2O \Rightarrow NaOH + NaSH^*$

* sulfidrilo o hidrosulfuro de sodio

5.3.5.5.1 Reacciones con la Lignina

La reacción con la lignina implica una solubilización de la misma, debido al rompimiento de las moléculas en los puntos reactivos de este componente. Los grupos reactivos son los metoxilos de las unidades de fenilpropano y los enlaces tipo ß aril éter entre las unidades mencionadas; justamente son estos enlaces los más abundantes como puntos reactivos, correspondiendo a más del 70 por ciento del total de uniones existentes en la lignina, predominando las de tipo ß (48 %). Los enlaces aril éter se encuentran en unidades fenólicas y no fenólicas, con las siguientes características de reacción:

- **Enlaces aril éter de unidades fenólicas**: se hidrolizan fácilmente por las condiciones del proceso al sulfato, se forman como productos de la reacción derivados quinónicos y episulfuros; los der. quinónicos reaccionan más rápido con el ión sulfidrilo HS, que con el hidroxilo. lo que explica el menor tiempo de cocción en el proceso kraft. La energía de activación es de 121 kJ/mol

- **Enlaces aril éter de unidades no fenólicas:** su hidrólisis esta más influenciado por la concentración de los hidroxilos . Como producto se forman epóxidos; la energía de activación es de 123 kJ/mol.

Una teoría complementaria en la deslignificación es por acción del sulfuro de sodio, que forma tiolignina (lignina sulfonada), a bajas temperaturas (Enkvist), y concluye con la reducción de la lignina, lo que acelera la deslignificación (Tishchenko).

Las reacciones de los reactivos del proceso kraft con la lignina se resumen de la siguiente manera:

a) Reemplazo del grupo hidroxilo:

$L^1\text{-OH} + HSNa \Rightarrow L\text{-SNa} + H \Leftrightarrow O$

tiolignina

Esta reacción tambien se representa de la siguiente manera:

L-C(=O)(-) + NaHS ⟹ L-C(-OH)(-SNa)(-H)

Tiolignina soluble

[1] L : lignina

b) Formación de lignato:

$NaOH + L\text{-OH} \Rightarrow L\text{-ONa} + H \Leftrightarrow O$

lignato soluble

c) Rotura de un óxido de etileno

L-CH-CH (-O-) + NaHS   L-CH-SNa-CH(OH)

d) Adición de sulfuro a doble enlace

$L\text{-CH=CH-R} + NaHS \Rightarrow L\text{-CH(SNa)-CH} \Leftrightarrow \text{-R}$

Reacciones de Condensación: Se forman entre los carbonos ∞ y ß de las unidades propílicas de las fracciones de lignina, lo que facilita la polimerización de la misma y su re-precipitación sobre las fibras. Esta reacción se evita manteniendo el pH de la reacción por encima de 10 hasta el final de la cocción.

Formación de Mercaptanos: Durante la cocción al sulfato, se forman compuestos volátiles, producto de la reacción entre el azufre de los reactivos y los grupos metoxilos ($O\text{-}CH_3$) de las unidades de fenilpropano; estos gases, por su mal olor, son cotribuyentes de la contaminación atmosférica de las plantas de pulpa. Los productos formados son:

-metilmercaptano $L\text{-}OCH_3 + HS \rightarrow CH_3\text{-}SH + L\text{-}O$

-sulfuro de dimetilo $L\text{-}OCH_3 + CH_3S \rightarrow (CH_3)_2S + L\text{-}O$

-disulfuro de dimetilo $2\, CH_3SH + \frac{1}{2}\, O2 \rightarrow (CH_3)_2S_2 + H_2O$

La formación de mercaptanos es notoria cuando se trabaja con maderas de latifoliadas, que presenta 2 grupos metoxilos OCH_3, del alcohol sinapílico frente a 1 unidad del alcohol coniferílico.

5.3.5.5.2 Reacciones con Carbohidratos

A pesar del control de las condiciones de cocción y los reactivos utilizados, controlada con la lignina; sin embargo siempre habra degradación o reacción con los carbohidratos , ya sea con las hemicelulosas, celulosas del tipo alfa, beta y gamma, además de algunos monosacáridos y oligosacáridos presentes en la materia prima.

La alta alcalinidad y la temperatura influye en una degradación rápida de las hemicelulosas, especialmente de los hexosanos; asimismo las fracciones de celulosa del tipo beta y gamma tambien se solubilizan en el medio de cocción.

Con la celulosa, que es la fracción deseada, ocurre tres tipos de reacciones:

(1) **reacción de "peeling"** sobre las unidades terminales de las cadenas de celulosa, hay una eliminación consecutiva de las unidades de anhidroglucopiranosa, con formación de ácido glucosacarínico, y la respectiva disminución del grado de polimerización;

(2) **reacción de "stopping"** es la reacción de detención en la unidad terminal, con la formación de ácido metasacarínico y la estabilización de la reacción anterior.

(3) **hidrólisis de enlaces ß, 1-4**, con una solubilización parcial o total de la cadena; se da en la región amorfa de la celulosa.

Con las fibras, los efectos físico-químicos son los siguientes:
(1) hinchamiento de la fibra
(2) adsorción de carbohidratos disueltos, sobre las fibras

Con las hemicelulosas, las reacciones son :
(1) hidrólisis alcalina y solubilización
(2) hidrólisis de grupos acetilos en hemicelulosas acetiladas

5.4 BLANQUEO

El blanqueo es un proceso que eleva el grado de blancura de las pulpas celulósicas; se le asocia con la calidad de las fibras blancas para elaborar papeles de escritura e impresión. A pesar de su importancia, en la actualidad su aplicación merece atención por el efecto contaminante que genera. En muchas fábricas de pulpas químicas blanqueadas, aún se eliminan de 150 a 200 m^3 de efluentes por tonelada de pulpa blanqueada. La historia del blanqueo se remonta desde el descubrimiento del cloro, en 1774 por Scheele, utilizado en forma gaseosa, para blanquear fibras textiles, luego pajas y pulpas de madera. Posteriormente se emplearon hipocloritos (Na y Ca), en una sóla etapa de blanqueo.

El desarrollo en técnicas industriales de almacenamiento de gases y la electrólisis, influyeron en la mejora de técnicas para de blanqueo, en varias etapas. Asimismo, la aparición del dióxido de cloro permitió mejorar la blancura y resistencia de las pulpas blanqueadas, en especial por la especificidad de este reactivo sobre la lignina; destacaron los trabajos de Rapson, año de 1946, en Canadá (García y Vidal-1984). Igual importancia tiene el uso de los peróxidos para blanqueo de pulpas de alto rendimiento, y el del oxígeno , en 1960, en Rusia.

La tendencia actual del blanqueo es al uso de enzimas que favorecen las reacciones de deslignificación, cuyo desarrollo permitiría dar un cambio radical en el proceso, debido a la reducción de las cargas de efluentes. También es seguro que podría influir el cambio del patrón de conducta al referirnos a la calidad de los papeles, considerando que no siempre es necesario tener un alto grado de blancura, sobretodo en papeles de una vida útil corta; como se verá más adelante, según la escala standard de clasificación de blancura, la mayoría de las pulpas se blanquean a valores de 80 a 90 por ciento, valores que estan en relación directa con el consumo de los reactivos blanqueadores. Sin embargo valores de 50 a 60 por ciento en blancura podrían ser aceptados, en papeles de "poca durabilidad"; un buen ejemplo es el papel periódico de diarios, elaborados con mezclas de pulpas químicas y mecánicas.



FIGURA 5.5: Pulpa química blanqueada

5.4.1 Definición

Es un proceso, posterior al pulpeo, efectuado con el fin de elevar el grado de blancura de la pulpa, bajo condiciones controladas, con una mínima degradación de carbohidratos (celulosa) y el menor costo relativo. En el blanqueo se alteran compuestos cromógenos, con reacciones de oxidación, con disolución de masa. El compuesto cromógeno es la lignina, modificada durante el pulpeo, que absorbe luz visible. Las reacciones de blanqueo son heterogéneas y se expresan, al igual que el pulpeo químico, mediante la ecuación de Arrheneius:

$$k = AC^{-E/RT}$$

Mediante la oxidación, la lignina se solubiliza y es eliminada, quedando sólo los carbohidratos en la pulpa, principalmente celulosa, cuyo color intrínseco es blanco. El blanqueo se aplica cuando la pulpa

química presenta valores bajos de lignina residual (menos del 5 %).

5.4.2 Determinación de Blanqueador

La cantida de blanqueador se estima a través del Indice Kappa, que es un método indirecto que evalua la lignina residual de la pulpa química a través de reacciones de oxidación de la lignina con el 50 % del $KMnO_4$ agregado en la reacción. Los métodos aplicados son TAPPI 236, ISO R302, SCAN C1, NTP 12:02.002 y UNE 57.034. Para pulpas químicas para blanqueo de alto grado (80-95%), el I. kappa varia de 15-20; para pulpas grado medio (65-80 %) el I. kappa varia de 25-40; valores de kappa mayor a 40 no son de calidad blanqueable.

Los valores de índice kappa presentan una relación directa con la lignina residual. Una ecuación válida para este caso es la obtenida por Bueno (1979) en la pulpa kraft de 53 especies forestales del trópico peruano, sien do la ecuación la siguiente:

% Lignina residual = 0,3249 + 0,1525 (I.kappa)

R = 0,9441 , % R^2 = 89,13 %

Casey propone la siguiente ecuación entre el I. kappa con la lignina

% Lignina residual = 0,147 * I. Kappa

PROBLEMAS

PROBLEMA 5.1

En la ecuación que evalúa el rendimiento del proceso kraft, propuesta por Casey :

$$Y = P - Q\,(lg_{10}H)*(AE)^n$$

donde

P: masa materia seca que entra al proceso; en valor porcentual, P=100; Q , n: constantes; H: factor H del proceso; AE: álcali efectivo (% como Na_2O)

Para un facto H=1000 y AE%=17,5, se obtuvo un rendimento de pulpeo de 50%. Pero, al mismo valor de factor H y con AE%=21,6, el rendimiento se eleva a 45. Se pide estimar los valores de las constantes de una ecuación empírica que sirva de modelo al proceso estudiado. Reemplazando valores, se tienen dos ecuaciones:

(i) $50 = 100 - Q\,[Lg_{10}(1000)]*(17,5)^n$

$$50 = 100 - Q*3*(17,5^n)$$

$$50/3 = Q*(17,5^n)$$

por logaritmo: Lg (50/3) = Lg Q + n*Lg17,5

$$1,222 = Lg\ Q + 1,243*n$$

(ii) $45 = 100 - Q\,(Lg_{10}(1000)*(21,6)^n$

$$45 = 100 - Q*3*(21,6^n)$$

$$55/3 = Q*(21,6^n)$$

por logaritmo: Lg (55/3) = Lg Q + n*Lg21,6

$$1,263 = Lg\ Q + 1,334*n$$

En un sistema de dos ecuaciones con 2 incógnitas (i) y (ii):

$$1,222 = Lg\ Q + 1,243*n$$

$$1,263 = Lg\ Q + 1,334*na$$

$$n = 0,041/0,091 = 0,45055$$

Y calculando el valor de Q:

$$Lg\ Q = 1,222 - (1,243*0,45055)$$

$$Lg\ Q = 0,662$$

$$Q = 10^{0,0622} = 4,59$$

El modelo de ecuación, empírica, del estudio es:

$$\mathbf{Y = 100 - 4,59\,(lg_{10}H)*(AE)^{0,45055}}$$

Para 3 valores de factor H (800, 1000 y 1200) el modelo de ecuación es representada en la figura 5.4.

Factor H	Rendimiento de pulpeo %		
	Álcali Efectivo (% Na_2O)		
	16	18	20
800	53,53	51	48,61
1000	51,98	49,36	46,9
1200	50,71	48,02	45,5

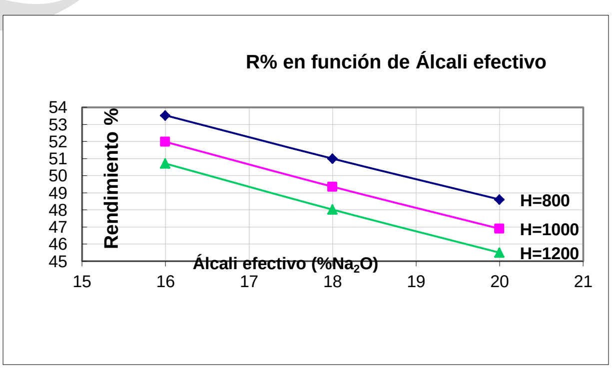


FIGURA 5.4: Rendimiento de Pulpeo en función del Álcali Efectivo, para 3 Valores de Factor H.

PROBLEMA 5.2

Tomando como base, la ecuación, problema 5.1:

$$Y = P - Q\,(lg_{10}H)*(Aa)^n$$

donde

P: masa de materia seca que entra al proceso; si se evalúa valores porcentuales, P=100

Q , n: constantes; H: factor H del proceso; Aa: álcali activo (% como Na_2O)

Para un factor H=1000 y Aa%=17,5, se obtuvo un rendimento de pulpeo de 50%. Pero, al mismo valor de factor H y con Aa%=21,6, el rendimiento se reduce a 45. Se pide estimar los valores de las constantes de una ecuación empírica que sirva de modelo al proceso estudiado.

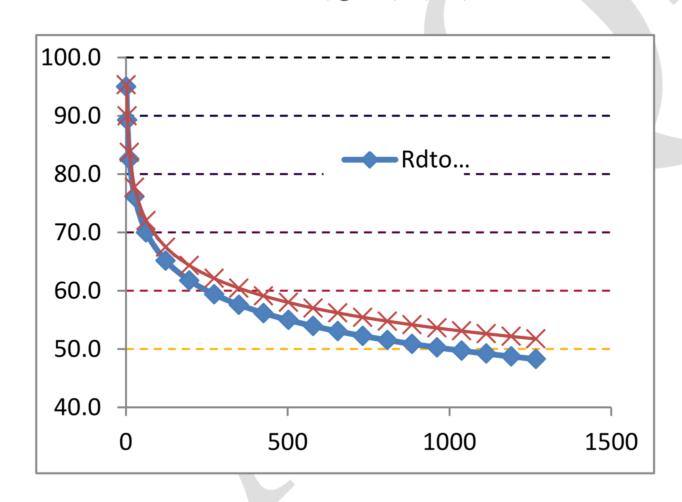
Reemplazando valores, se tienen dos ecuaciones:

(i) 50 = 100 - Q $[Lg_{10}(1000)]*(17{,}5)^n$ 50 = 100 - Q*3*($17{,}5^n$) 50/3 = Q*($17{,}5^n$) resolviendo por logaritmo: Lg (50/3) = Lg Q + n*Lg17,5 **1,222 = Lg Q + 1,243*n**	(ii) 45 = 100 - Q $(Lg_{10}(1000)*(21{,}6)^n$ 45 = 100 - Q*3*($21{,}6^n$) 55/3 = Q*($21{,}6^n$) resolviendo por logaritmo: Lg (55/3) = Lg Q + n*Lg21,6 **1,263 = Lg Q + 1,334*n**

Resolviendo un sistema de dos ecuaciones con 2 incógnitas (i) y (ii): 1,222 = Lg Q + 1,243*n 1,263 = Lg Q + 1,334*n n = 0,041/0,091 = 0,45055	Y calculando el valor de Q: Lg Q = 1,222 - (1,243*0,45055) Lg Q = 0,662 Q = $10^{0{,}0622}$ = 4,59

El modelo de ecuación, empírica, del estudio es:

$$\mathbf{Y = 100 - 4{,}59\ (lg_{10}H)*(Aa)^{0{,}45055}}$$



Rendimiento de Pulpeo en función de factor H, para 2 Valores de álcali activo.

5.5 PRODUCCIÓN DE PULPA EN EL PERÚ

La producción de pulpas celulósicas en el Perú es nula a partir de madera; el único antecedente fue la fábrica Papelera Pucallpa, zona del Manantay, región Ucayali,con una capacidad instalada de 8000 t/año (30 t/día). La fábrica producía pulpa química mediante un proceso kraft modificado: soda-azufre, a partir de la madera de cetico (*Cecropia* spp., Moráceae); se obtenian pulpas sin blanquear y blanqueadas. La fábrica cerró en el año de 1982 por problemas económicos, influyendo la mala planificación del abastecimiento de la materia prima y técnicamente por la maquinaria obsoleta empleada en la producción.

La producción de pulpas celulósicas en el Perú se obtiene actualmente a partir del bagazo de la caña de azúcar (Saccharum officinarum L.). Existen 2 fábricas instaladas de las cuáles 2 se encuentran operativas; las 2 fábricas emplean el proceso químico a la soda:

- Papelera Trujillo (TRUPAL), Santiago de Cao, La Libertad, inicialmente se planificó con una capacidad de 100 mil t/año de pulpa blanqueada y 75 mil t/año de pulpa sin blanquear. A la fecha esta fábrica emplea el proceso químico a la soda de alto rendimiento (mayor a 55%) e índice kappa mayor a 80. La pulpa se utiliza para la fabricación de papeles para corrugar y liner.
- Sociedad Paramonga, norte de Lima, con una capacidad instalada de 120 mil t/año de pulpa blanqueada. Esta fábrica, privatizada en 1998, tiene un programa de ampliación para producir pulpas de alta blancura.

En el año de 1981, la industria de pulpa sólo utilizó el 60 % de su capacidad instalada, y sólo el 40% el año de 1982. Hacia el año de 1986, la producción estimada de pulpas celulósicas en el Perú fue de 75 mil t/año. Para el mismo año, se importó 40 mil t de pulpas de diferentes tipos, blanqueadas y sin blanquear. Actualmente, en el año 2002, se preveé que las 2 fábricas operativas utilizarían más del 80% de su capacidad instalada. Las pulpas de bagazo se destinan para la producción de papeles blancos (bond), bolsas kraft (en mezcla con fibras largas), y para cartones corrugado y liner.

Hasta el año 1990, el Gobierno protegía la industria papelera mediante la aplicación de aranceles: se aplicaba 15% de arancele para el papel periódico (precio CIF) y 45% para el papel bond; el arancel promedio de entonces fue 5% y hoy en día es 0. A fin de satisfacer la demanda nacional de pulpas celulósicas, se importan de los países tradicionalmente pulperos. Los precios estimados de las pulpas químicas blanqueadas que se importan en el Perú varían de 480 a 500 $US/t pulpa, precio FOB. Se importa pulpas de Chile (flete 40$/t), Norteamérica (flete 80 a 160 $/t) y de los Países Escandinavos (flete 160$/t).

5.5.1 Especies Tropicales para Papel

La industria papelera puede ser una buena alternativa para el mejor uso de los recursos forestales en la Amazonía. El laboratorio de Pulpa y Papel de la Universidad Nacional Agraria de La Molina (UNALM), en el transcurso de 30 años (1969-1999), efectuó investigaciones en diferentes procesos de pulpeo, principalmente por el proceso kraft, con maderas de la Amazonía Peruana, destacando la aptitud papelera de ciertas especies madereras comerciales y no comerciales. Los estudios de laboratorio han demostrado las buenas aptitudes papeleras de la madera de huamansamana y tangarana de altura, especies sin valor comercial actual; tambien se encontró buena aptitud papelera con las maderas de bolaina, tornillo, cumala, requia, etc., estas utilizadas por la industria forestal. El caso de la bolaina es destacable pues se ha encontrado un crecimiento volumétrico en parcelas demostrativas. Esta especie, al igual que la huamansamana, cetico y la tangarana son especies de rápido crecimiento, típicas de bosques secundarios de la Amazonía. Por otro lado, los estudios en proceso kraft con la madera, de diferentes especies comerciales, plantean un probable uso de los residuos de madera de otras industrias forestales.

De los estudios efectuados en la UNALM, entre 1969 a 1999, se llegó a estas conclusiones:

- Existen especies forestales de la Amazonía que presentan una aptitud papelera importante, con propiedades superiores al de muchos tipos de pulpas de uso actual en las fábricas de papel en el Perú.
- Es posible efectuar un aprovechamiento de los residuos de las industrias forestales de la Amazonía del Perú y destinarlos a la producción de pulpa para papel.
- Los bosques secundarios de la Amazonía (bosques intervenidos) cuentan con un gran número de especies, sin valor comercial actual,

cuyo aprovechamiento puede orientarse hacia fines productivos para fabricación de pulpas celulósicas.

En el cuadro 4.5 se presentan valores de propiedades de especies de pulpas kraft de la Amazonía Peruana.

De los mismos estudios, se mencionan las siguientes recomendaciones

- Se recomienda efectuar estudios silviculturales con las especies forestales que presentaron valores de resistencia importantes, evaluadas en el presente trabajo.
- Se recomienda efectuar estudios de integración de industrias forestales de la Amazonía de manera de aprovechar los residuos de madera con fines de producción de pulpas celulósicas.

CUADRO Nº :Propiedades de Pulpa Kraft Especies Forestales de la Amazonía del Perú (45°SR; R% =50%).

Especie	IK	LR (km)	ID (mN m^2/g)
Balata gomosa (*Manilkara sp.*)	25	8,2	16,0
Bolaina (*Guazuma crinita)*	24	9,3	7,5
Capinuri de altura *(Clarisia sp.)*	50	7,5	11,7
Carahuasca (*Guatteria modesta)*	26	7,4	11,4
Cumala blanca (*Virola rufula)*	18	7,9	14,1
Huarmi caspi (*Sterculia sp.)*	20	8,3	18,8
Huiracaspi (*Xantoxylon sp.)*	12	9,4	11,7
Huamansamana (*Jacaranda copaia*)			
Manchinga (*Brosimum uleanum)*	52	7,3	16,6
Maquisapa (*Apeiba membranaceae)*	44	7,3	11,6
Sapote (*Matisia cordata)*	84	7,4	11,8
Shiringa masha (*Micranda spruceana)*	23	8,2	18,8
Tamamuri (*Brosimun aubletti)*	35	10,9	11,9
Tangarana blanca (*Sclerolobium sp.)*	20	8,9	12,3
Tornillo (*Cedrelinga catenaeformis)*	16	8,1	11,5
Yanavara (*Oliganthes sp.)*	34	8,5	11,3

R% rendimiento de pulpa; IK: índice kappa; LR longitud de rotura; ID índice de rasgado

Bibliografia

1. **Aróstegui, A. 1974.** Características Tecnológicas y Usos de la Madera de 145 Especies del País. Ministerio de Agricultura-UNALM. Lima 478 pp.
2. **Bueno, J.** 1973.
3. **Gonzales, E. 1987.** Posibilidades de Utilización de Especies Forestales Tropicales para la Industria de Pulpa y Papel en el Perú. Trabajo aceptado en las III Jornadas ATCP, Concepción. 5 pp.
4. **Gonzales, E. 1992.** Utilización de la Corteza de *Eucalyptus globulus* Labill en la Obtención de Pulpa Química al Sulfato. Tesis Mg. Sc. Industrias Forestales. Escuela Post-Grado, UNALM. Lima. 132 pp. y anexos.
5. **INRENA 1996.** Estadística Forestale del Perú. Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú. Ministerio de Agricultura. Lima.
6. **Lao, R. 1969.** Catálogo Preliminar de las Especies Forestales del Perú. Revista Forestal del Perú. Vol 3 N°2. pp : 3-59.
7. **Stamn**
8. **UNALM. 1999.** Archivo de Investigación del Laboratorio de Pulpa y Papel. LPP. Dpto. Industrias Forestales, Universidad Nacional Agraria, La Molina (documento interno). Lima.

VI. EL PAPEL

6.1 ANTECEDENTES

La historia del papel, en la práctica, casi siempre ha estado asociada a la evolución y desarrollo de la escritura por la búsqueda de una base o soporte que permita efectuar escribir con facilidad, manipulable, entre otras ventajas. Los antecedentes de la escritura se inician con las pinturas en las paredes y bóvedas en cuevas; luego se recurre al uso de tablas de barro o arcilla, sobre piedra y tambien en tablillas metálicas, de plomo, pasando luego a las de cera donde era más fácil escribir. Son los egipcios, quienes, aproximadamente desde el año 3000 AC utilizan el papiro (*Cyperus papyrus*); los tallos de estas plantas, luego de ser "aplanadas" eran cruzadas entre si formando una base delgada y algo flexible puy parecida al papel de hoy en día; su uso es reportado hasta el siglo X de la era presente; note el lector, el origen de la palabra *papel*. Posteriormente, en Europa se usa el pergamino (piel curtida y elaborada), con origen probable en Pergamo, antigua Persia; su uso se inició probablemente cerca del año 90 AC hasta el siglo XV. Sin embargo, con las bases para escritura antes mencionadas se encontraba siempre dificultad en su uso debido a la poca flexibilidad, alto peso y voluminosidad, ademas de los problemas en su obtención y costos de elaboración en ciertos casos. La aparición del papel corrige los problemas antes mencionados.

Es en la China, el año 105 DC, donde *T'sai Lun*, asesor del Emperador, hizó la presentación ante la Corte Imperial, del papel: este era un producto laminar obtenido a partir de una masa de fibras provenientes de las corteza de la **morera papirífera** (*Broussonetia papyrifera*) y del ramio (*Boehmeria nivea*). Las fibras, en suspensión acuosa, eran retenidas en una malla, entretejida de tirillas de bambú, formándose una lámina delgada y flexible. La unión entre fibras en la lámina se vió favorecida por el uso de una sustancia viscosa desconocida, probablemente un extracto mucilaginoso de agar-agar. Despues de la fecha mencionada, *T'sai Lun* quedo registrado como el inventor oficial del papel; sin embargo, en la actualidad varios historiadores hacen objeción al inventor de tan importante obra. Estudios han demostrado que en realidad el papel apareció probablemente 2 a 3 siglos antes de la fecha oficial de invención, en la misma China. El mérito del autor oficial radica en haber descrito el proceso de fabricación del papel que elaboraban los campesinos. Posteriormente, hacia el año 600 DC la técnica de formación del papel fue llevada al Japón, donde se obtuvo a partir de las fibras de corteza de **kozo** (B. *papyrifera*) , **mitsumata** y **gampi.** Luego, hacia el año 751 DC, como consecuencia de la guerra entre el Turquestán con la China, se transmite la técnica del papel a los árabes, quienes desarrollan ampliamente esta actividad, teniendo a Bagdad como su principal centro papelero (en el siglo IX). Son los árabes quienes difunden la técnica de elaboración del papel hacia Europa, através del sur de España, en el siglo X. Hacia el siglo XIII, ya existía una amplia difusión del papel en todo el continente europeo, siendo los italianos y franceses quienes perfeccionaron la técnica en el siglo XV. Con la colonización de América por los españoles es que el papel se difunde hacia estos lugares, entre los siglos XVII y XVIII.



FIGURA 6.1: Formación Manual del Papel

Hasta entonces, todo el papel consumido era obtenido mediante el empleo de moldes formadores o bastidores, con dimensiónes definidas, lo que en cierta manera limitaba la producción, influyendo en costos altos para su elaboración. Luego de esta forma de elaboración papel, manual y estática con moldes, se pasó a la formación dinámica, mediante la técnica de fabricación en continuo. Se atribuye a *Louis N. Ro*bert, en el año 1799, la invención de la técnica de fabricación contínua del papel, aunque con muchas imperfecciones en la formación. Años más tarde, los hermanos *Henry* y *Sealy Fourdrenier*, en 1804, desarrollaron la primera máquina papelera

comercial, prototipo del modelo que adopta su nombre hoy en día; la producción de esta máquina se inició en base a un proyecto de *B. Donkin*, alcanzando una mayor perfección entre 1889-1890. El otro método de formación dinámica, es la máquina de cilindros o formadora redonda (de bombo), instalándose la primera máquina de cilndros en los EEUU en 1817.

La formación dinámica implicaba la retención de las fibras, en forma laminar, en una tela, en forma de banda contínua en movimiento; la suspensión de fibras salia por la abertura rectangular inferior de una caja abierta que antecede a la tela; la velocidad de salida es influenciada por la presión atmosférica. En la forma redonda, la formación se hacia sobre la tela que envolvía un cilindro semisumergido en la suspensión; la ventaja de este caso es que se podían juntar en húmedo las láminas formadas por varios cilindros a la vez, logrando obtener un papel de mayor gramaje (cartón multicapas). Con los sistemas de producción papelera de caja abierta sólo se alcanzan velocidades entre 120-200 m/min, limitando la producción en las fábricas; sin embargo, hoy en día, el gran desarrollo tecnológico alcanzado en esta industria ha permitido el diseño de máquinas papeleras cuyas velocidades superan los 1000 m/min permitiendo un aumento significativo de la producción, eficiencia y calidad del producto. Las innovaciones se aplican a nivel de caja, con sistemas cerrados presurizados y con zonas de formación de doble tela. La variedad de papeles que se elaboran hoy en dia es sumamente amplia, con ventajas comparativas que le permiten competir con materiales tradicionales y modernos.

Es así como se describe el origen y la importancia del papel, considerado como un producto básico y como un material de mucha importancia en el mundo moderno. El consumo del papel se relaciona con el grado de desarrollo económico y cultural de una región: países con un grado industrial desarrollado y amplia difusión de la información, el consumo percápita del papel supera los 300 kg/hab*año (EEUU, Canadá, Japón y Europa Occidental); países de desarrollo intermedio tienen consumos entre 100 a 200 kg/hab*año (Europa Oriental). En Latinoamérica los valores oscilan entre 10 a 40 kg/hab*año; en muchos países del África los valores son inferiores a 10 kg/hab*año.

6.2 Definición

El papel es un material de estructura fibrosa, anisotrópico, presentado bajo la forma de hoja o lámina; las fibras que la conforman se encuentran colapsadas, entrecruzadas y formando, entre si, enlaces de unión.

Al mencionar que el papel es anisotrópico, quiere decir que el mismo presenta diferente comportamiento en sus tres direcciones: las direcciones en el plano, dirección máquina o de fabricación (X), dirección contraria o transversal (Y) y por último la dirección Z o perpendicular al plano; esta última a pesar del bajo valor numérico, tiene mucha importancia sobre las propiedades y el comportamiento del papel. Respecto a la formación, las fibras, favorecidas por su movilidad, se van entrecruzando al caer sobre la tela mientras ocurre el drenado y por las características de composición, se forman los enlaces entrefibras; luego de formada la hoja, esta se debe prensar con el fin de eliminar agua y para aumentar el área de contacto, ocurriendo el colapsado o aplastamiento de las fibras, aumentando la capacidad de enlace interfibrilar.

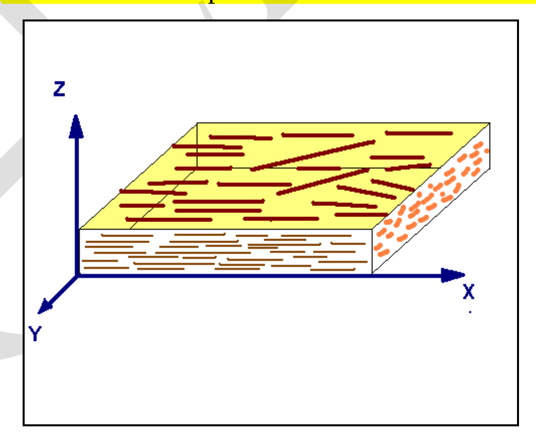


FIGURA 6.2: Esquema, en 3 Dimensiones, de la Distribución de Fibras en el Papel

6.3 Cohesión Fibrilar en el Papel

Para la cohesión fibrilar se toma en consideración los radicales libres para enlaces en la celulosa y hemicelulosa; en el principal componente se consideran 3 grupos reactivos, radicales OH, por cada unidad de anhidroglucosa, capaces de formar enlaces interfibrilares; figura 6.3.

FIGURA 6.3: Grupos OH Reactivos dentro de cada Unidad en la Cadena de Celulosa

6.3.1 Cohesión Enlaces Secundarios

Esta cohesión se debe a la presencia de los enlaces de *Van der Walls* que tiene importancia como efecto de grupo, gobernando la cohesión de las fibras mediante fenómenos simultáneos de mojado y adherencia entre las capas celulósicas. Las fuerzas de *Van der Walls* tienen 3 categorías:

- valencias secundarias no polares
- valencias secundarias polares
- enlaces de hidrógeno

6.3.1.1 Valencias Secundarias No Polares

Corresponde a un fenómeno de atracción que ocurre a distancias cortas en todas las moléculas; tambien es denominada fuerza residual. Esta fuerza ocurre por la interacción mutua que se genera entre los electrones y tambien a nivel de átomos. Son considerados enlaces débiles y su eficacia es válida para pequeñas distancias; son grupos no polares los hidrocarburos y parafinas.

$$\text{Intensidad de Energía } I = (1/d^6)$$

siendo el valor de $I < 2$ kcal/mol

6.3.1.2 Valencias Secundarias Polares

Se presentan con unidades de oxígeno; corresponde a un mecanismo de atracción eléctrica generada por el dipolo; la valencia polar aparece cuando hay cargas electronegativas que se acumulan en parte de la molécula, provocando un desequilibrio eléctrico, que crea un dipolo, con un enlace electrostático entre ellos. Hay mayor electronegatividad en diferentes elementos químicos, por ejm los que se mencionan en el siguiente orden: flúor, oxígeno, cloro, nitrógeno, etc. Se consideran como grupos muy polares a los derivados hidroxílicos (OH) y carboxilos (COOH), el agua. Como medianamente polares se consideran a los derivados cetónicos (C-O-C).

6.3.1.3 Enlaces Puentes de Hidrógeno

Son los grupos de enlaces más importantes por presentar mayor intensidad (el valor de I varia entre 4 a 10 kcal/mol) y por su mayor potencial de formación. Estos enlaces se presentan cuando el hidrógeno **H** atrae un átomo fuertemente electronegativo (O ó N) de otra molécula. Con la presencia del agua, en cuyo estado forma un ángulo de 105 °C (**HOH**), forma un dipolo, y el oxígeno entra en contacto con el **H** de alrededor; de esta manera interactúan los grupos **OH** de una fibra con el de otra. Ver figura 6.4.

6.4 Composición del Papel

La estructura principal del papel corresponde a un entramado fibroso, que actua como "esqueleto", existiendo además, otros componentes que se incorporan, con el objetivo de brindar o mejorar ciertas propiedades del papel, como son su higroscopicidad, textura, suavidad, blancura y opacidad, entre otros. Son muy expecionales los casos donde el papel que se utiliza es exclusivamente fibras (papel filtro) pero aún así, se requerirá de aditivos para mejorar la resistencia del papel en húmedo. Las materia primas para la industria de papel son de dos tipos: materias fibrosas y materias no fibrosas.

6.4.1 Materias Fibrosas

Las fibras vegetales es la parte más importante del papel. Su capacidad de enlaces permite forma la estructura fibrosa sobre la que se alojan otros componentes; es necesario que las fibras tengan un tamaño adecuado para formar el papel. Sobre base seca, las fibras representa valores de aplicación entre 80 a 97 %.

En la fabricación del papel es muy común utilizar más de un tipo de fibra; las formulaciones fibrosas se expresan proporcionalmente en función de la calidad y costos del papel; ejemplo de una formulación es en papel periódico, cuya composición es 70-80% pulpa mecánica y 20-30% pulpa química.Otro en papel de bolsas: 30% pulpa a la soda de bagazo, oscura, y 70% pulpa kraft de pino, oscura[a]; en papeles tissue se utiliza de 20-100 % pulpa química blanca y 80-0 % fibra reciclada destintada.

Las materias fibrosas pueden ser:

6.4.1.1 Pulpas celulósicas

Fibras primarias, llamadas tambien pulpa virgen o de primer uso; son utilizadas sin blanquear (papeles de embalaje, cartones) o blanqueadas (papeles de escritura e impresión). Según el tipo de papel, su calidad esta en proporción a la cantidad utilizada de estas fibras. Las pulpas más utilizadas son:

- pulpas químicas, principalmente kraft, para todo de papeles y cartones;
- pulpas semiquímicas, NSSC, para cartones;
- pulpas quimiotermomecánicas CTMP, para papeles de impresión de bajo costo;

---

[a] Formulación de Sociedad Paramonga Ltda (1979)

- pulpas mecánicas de piedra PGW y termomecánica TMP, para papeles de diario.

6.4.1.2 Fibras secundarias

Tambien denominadas fibras de segundo uso, corresponde al papel reciclado (papelote o "wastepaper"). El papel reciclado requiere pasar por las siguientes etapas:

-clasificación y selección del reciclado
-depuración o limpieza, eliminación de impurezas pesadas (arena, metales) y voluminosas (plásticos;)
-destintado, separación de tintas, de las fibras, por lavado y/o flotación;
-blanqueo, para reestablecimiento de blancura, hasta alcanzar un grado comercial.

Dependiendo del tipo de papel a elaborar, el reciclado requiere de una o más etapas; así por ejemplo, para elaborar cartones sólo se requiere clasificación y depuración; pero si se desea obtener papeles para impresión será necesario el destintado y blanqueo. Sin embargo, la calidad del nuevo papel obtenido será cada menor, comparando con el papel de pulpa virgen. Al reciclar el papel, hay un deterioro progresivo de las fibras por efectos de corte y temperatura a la que van siendo sometidas en cada reciclado. En teoría se estima que una fibra puede soportar entre 5 a 7 reciclados, hasta que finalmente se destruye o pierde la mayor parte de sus propiedades de enlace y de resistencia.

6.4.2 Materias No Fibrosas

Corresponde a la parte de **aditivos** que se utilizan en el proceso; aplicados sobre la base seca de papel, representa del 1 a 20 por ciento de su composición. Los aditivos se clasifican de la siguiente manera, según Vidal (ETSIIT-1988):

6.4.2.1 Aditivos Funcionales

Forman parte de la composición final del papel, cumpliendo una función específica dentro de su estructura, mejorando o modificando alguna de sus propiedades. En este grupo se menciona a las cargas, encolantes, resinas de resistencia, colorantes y pigmentos.

♦ **Cargas**: Son partículas minerales que se incorporan al papel; se aplica en proporciones de 5 a 20% (bms) con el objeto de abaratar costos, mejorar propiedades superficiales del papel.

♦ **Encolantes:** controlan el humedecimiento del papel. Los má utilizados son Dímero alquil ceteno (AKD), Anhidro Alquenil succínico (ASA) y la colofonia.

♦ **Resinas de resistencia** (i) **resistencia en húmedo:** papeles toalla o embalajes para refrigerar, en uso requieren una resistencia mínima en estado húmedo, que se adquiere con el uso de úrea-formaldehído, poliaminas,etc. (ii) **resistencia en seco:** necesarias en papeles de baja resistencia, que contienen reciclado. Ejm: almidones modificados y poliacrilamidas.

♦ **Colorantes y pigmentos:** modifican el color o la blancura del papel; se mencionan los colorantes (solubles), los pigmentos (insolubles) y los blanqueadores ópticos.

♦ **Otros Aditivos:** para una característica especial al papel: aditivos para aumentar la rigidez del papel, para control de la estabilidad dimensional, suavizantes, etc.

6.4.2.2 Aditivos de Control

Cumplen una función de regulación o control del proceso; forman parte de la formulación de la pasta pero no forman parte de la composición final del papel; ejemplos: microbicidas, antiespumantes, dispersantes, reguladores de pH, agentes de retención y drenado, *antipitch*, etc.

6.4.2.3 El Agua

Durante la preparación de la pasta, desde el desintegrado hasta la caja de entrada, las fibras van dispersas en un medio acuoso, consistencia entre 0,5 a 1%, variable según la operación. El agua tambien se utiliza como fase disolvente o dispersante de los aditivos; luego de la formación, el agua se reutiliza en un circuito de aguas blancas, que contiene sólidos (finos y cargas). Asimismo, existe una descarga de aguas fuera de fábrica, llámese **consumo**, como efluentes. El consumo varia según el tipo de papel elaborado: varía de 50-100 m^3 de agua por 1 t de papel. Casos especiales, como destintado consumen 104 m3/t, papel sulfito 220 m3/t y papel sanitario con fibras secundarias 94 m3/t ([10]). La tendencia de hoy en día es, sin embargo, llegar a un circuito cerrado del agua, con consumo cero.

6.5 CARGAS

Utilizados antiguamente como un adulterante del papel, en la actualidad es el segundo componente más importante, despues de las fibras. Al inicio, se empleaban cargas para bajar el precio del papel, que se comercializa por peso. Comparando precios unitarios ($/kg), las cargas son de mayor peso específico y menor precio que las fibras. Otras

ventajas técnicas del uso de cargas son mejorar la imprimabilidad, lisura, absorción de tintas, control de porosidad, estabilidad a la luz, entre otras. Estas ventajas influyen en la decisión de considerar las cargas como un componente importante para la fabricación del papel.

Definición: Las cargas son partículas minerales, insoluble, de origen natural o artificial, que se incorpora a la estructura del papel con el fin de modificar sus propiedades de apariencia o superficiales.

6.5.1 Requisitos

Para modificar las propiedades en el papel, las cargas cumplen ciertos requisitos:

- son blancas en apariencia, reflejando el máximo de luz visible; el valor de blancura es mayor a 80 por ciento;
- presentan alto índice de refracción, mayor al de celulosa; el valor varia de 1,6 a 2,5;
- la granulometría de partículas varia de 0,1-100 µm; su distribución depende del uso de las cargas: en pasta para papel o para estucado;
- las particulas se dispersan fácilmente en agua;
- químicamente inertes e insolubles en agua; no reaccionan durante el proceso de formación del papel;
- no se descomponerse por acción de la luz solar o por contacto con el aire;
- su peso específico es mayor al de la celulosa (1,5); sin embargo su constitución no permite que actúe como un material duro o abrasivo;

6.5.2 Funciones

Las cargas, en el papel:

- rellena espacios vacios entre fibras y por su mayor peso específico, aumenta densidad promedio en el papel, abaratando su costo;
- por su elevado índice de refracción, aumentan la opacidad;
- mejoran la suavidad o lisura;
- aumentan el valor de blancura;
- controlan capilaridad o porosidad del papel, facilitando absorción de tintas y mejorando característics de impresión;
- otorga estabilidad a colorantes dentro de la estructura fibrosa;
- casos especiales:
  - con $CaCO_3$,regula combustibilidad en papel cigarrillo;
  - con $BaSO_4$, otorga estabilidad dimensional en papel de fotografía;
  - con ZnS, actúa como producto aséptico que inhibe desarrollo de microorganismos, en papeles para envoltura de alimentos.

Sin embargo, la presencia de cargas en el papel:

- interfiere entre enlaces interfibrilares, disminuyendo resistencia;
- cuando son mal aplicadas, forman grumos en pasta, desmejorando aspecto y formación del papel;
- son poco afines a fibras, requiriendo agentes de retención; la mala retención de cargas hace que se liberen con facilidad durante uso del papel.

6.5.43 Tipos de Cargas

Entre las principales cargas se menciona a:

Carbonato de calcio $CaCO_3$, es la tiza, es de bajo costo y alto rendimiento de retención en papeles fabricados en medio neutro. En la actualidad es una de las más utilizadas.

caolín, silicato de aluminio $Al_2O_3*2SiO_2*2H_2O$. Es aún muy utilizada; en estado natural es la tierra de porcelana, arcilla blanca muy pura, conformada por sílice 45-60% y alúmina 33-40 %. Tiene un peso específico entre 2,25 a 2,80, factor calcinación 1,13; granulometria entre 0,5-5 µm (60 %);

talco, silicato de magnesio, de fórmula $4SiO_2*3MgO*H_2O$; son de bajo costo y aportan brillo y lisura al papel. Durante su aplicación tienen una buena retención; factor calcinación 1,035;

dióxido de titanio TiO_2, es la carga que brinda mejores propiedades al papel, es muy estable en suspensión a diferentes valores de pH. Es de aplicación limitada por su alto costo; granulometría 0,2-0,5 µm .

Sulfato de bario, $BaSO_4$, denominado blanco fijo, utilizado en papel fotográfico y planos. Tambien se utiliza como pigmento para estucado; aporta estabilidad dimensional al papel.

sulfuro de zinc ZnS, se usa en papeles de envolturas de alimentos, inhibiendo desarrollo de microorganismos; sin embargos se descompone a pH < 5.

Algunas propiedades de cargas se muestran en el cuadro Nº .

CUADRO : Propiedades de Cargas para Papel

	Ir	Pe
Caolín	1,56	2,5
TiO_2	2,75	3,84
$BaSO_4$	1,64	4,5
talco	1,56	
$CaCO_3$	1,57	2,71
ZnS_2	2,37	
celulosa	1,53	1,45
agua	1,33	1,0

Ir: índice de refracción; Pe: peso específico

6.6 ENCOLADO

La finalidad darle resistencia a la penetración de los fluídos; en el papel se busca brindar a la fibra una superficie (recubrimiento) de mayor energía que modifica el ángulo de contacto formado entre el líquido y la superficie del papel. El encolado se puede efectuar de dos maneras:

Encolado en masa, tambien llamado encolado interno, se lleva a cabo durante la preparación de la pasta; se busca que el producto de encolado quede retenido al interior de la estructura del papel.

Encolado en superficie, aplicado como aditivo de operación final, sobre el papel ya formado. En este caso tambien se puede modificar otras propiedades del papel como son la permeabilidad a fluídos, color, etc.

6.6.1 Teoría de Encolado

6.6.1.1 Mojabilidad del papel

La teoría de mojabilidad de un papel se relaciona con la fuerza de atracción del sólido (celulosa), superior a la cohesión interna del líquido, lo que afecta el ángulo de contacto entre el líquido y la superficie del sólido. El papel al ser mojado por un líquido polar (agua) con afinidad por la superficie de celulosa, forma un ángulo de contacto cercano a 0; el encolado busca aumentar el ángulo de contacto. El papel tambien puede ser mojado por fuerzas de capilaridad que permiten el ingreso del líquido a los espacios porosos dentro del papel. En la figura 6.2 se observa una representación del ángulo de contacto formado entre la superficie de una gota de agua con la superficie de papel.

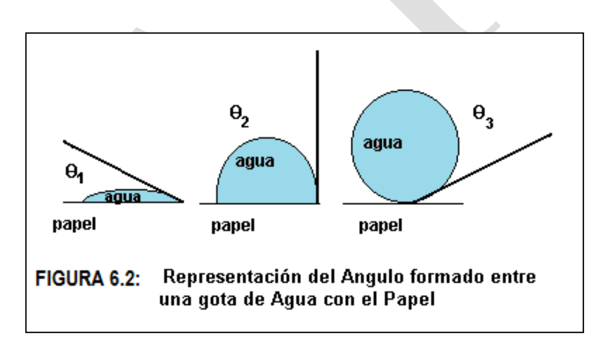


FIGURA 6.2: Representación del Angulo formado entre una gota de Agua con el Papel

Tal como se observa en la figura, hay 3 formas de clasificar el ángulo formado entre la superficie del papel con un líquido: se observa que a mayor ángulo de contacto, menor será la velocidad de humedecimiento del papel y viceversa.

6.6.1.2 Angulo de Contacto

En la energía de cohesión que se manifiesta al modificar el ángulo, interviene la propiedad de tensión superficial (TS)[b] o energía interna que mantiene unidas las moléculas superficiales. Los valores TS depende del medio en que se encuentra el líquido. Valores de TS de dos líquidos con aire son:

Coeficiente	TS (φ líquido:aire)
Agua	72,5 dinas/cm
Etanol	22,0 dinas/cm
Hidrocarburos	20-30 dinas/cm

La fuerza involucrada en la mojabilidad del papel es:

- fuerza atracción del sólido $T_1 = \varphi\,(1 + \cos\theta)$
- fuerza cohesión del líquido $T_2 = 2\varphi$

El encolado modifica el ángulo de contacto θ:

θ	0°	90°	180°
cos θ	1	0	-1
$T_1 = \varphi\,(1 + \cos\theta)$	2 φ	φ	0
$T_2 = 2\varphi$	2φ	2φ	2φ
$T_1 - T_2 =$	0	-1φ	- 2φ
Tipo papel	hidrófilo	semimojado	hidrófugo

Cuando las fuerzas de cohesión y de atracción (T_1-T_2) son iguales, el líquido ingreso al sólido; cuando la fuerza de cohesión del líquido es mayor, el líquido "no moja", no ingresa al sólido.

6.6.2 Encolado en Masa

De acuerdo al concepto general de encolado, se busca modificar el comportamiento superficial del papel hacia el agua, modificando el ángulo de contacto del papel (sólido polar) que se forma con el agua. El principal objetivo de esta forma de encolado es darle a la hoja resistencia a la penetración de líquidos; por uso, es necesario encolar a casi todos los papeles como los de escritura e impresión, bolsas y embalajes, envases de alimentos, papeles de construcción, cartones, etc.

6.6.2.1 Encolado Acido

Denominado así por el pH menor a 7 que se obtiene durante su aplicación. Para el encolado ácido se utiliza la colofonia que es un componente de la oleorresina de los pinos y abetos. La colofonia, actúa como un producto anfifático debido a que presenta grupos hidrofílicos y grupos hidrofóbicos; la parte polar se enlaza con la celulosa y la parte no polar o

[b] TS, expresado como ergio/cm² o dina-cm/cm² o dina/cm

hidrofóbica queda expuesta hacia afuera, lo que favorece la repelencia a la humedad.

La colofonia es una mezcla de isómeros de ácido resínico, cuyo componente principal es el ácido abiético: ácido abiético $C_{19}H_{29}COOH$ (Pm = 302). que conforma el 40 % del total de la colofonia y su isómero, el a. neoabiético, 60 %. La colofonia se aplica como emulsión saponificada, previa formación de una sal sódica orgánica (colofonia + NaOH $\Rightarrow$ jabón de resinato de sodio).

De la hidrólisis resulta el anión abiético (-) que otorga el carácter hidrófugo al papel, pero requiere un agente con carga positiva para precipitar sobre la celulosa, con radicales OH (-). Por lo tanto, se recurre a cargas contrarias para la fijación, mediante el uso del sulfato de alúmina (alumbre), que forma un complejo con la colofonia: resinato alumínico. El alumbre $(SO_4)_3Al_2$, se disocia en agua, generando acidez:

$$(SO_4)_3Al_2 + 6\ H_2O \Rightarrow 2\ Al(OH)_3 + 3\ SO_4^{=} + 6\ H^+$$

El anión abiético, de la resina, a través de su radical COO^-, se asocia al OH de la celulosa, por la capacidad coordinante del aluminio, que neutraliza la repulsión; el aluminio (Al^{+3}) forma complejo con 3 unidades de ácido abiético, formando triabietato de Al; el pH óptimo de la reacción es 4-5. El alumbre se añade para neutralizar cargas negativas (resina+fibras), hasta un potencial 0 (pasta isoeléctrica). En la práctica se agrega 1-2 % de resinas y 1,5-3 % en alumbre. El complejo resínico cubre los poros del papel, con los grupos hidrófugos hacia el exterior. La hidrofilia de la celulosa queda enmascarada y detiene la penetración capilar del agua, elevando el ángulo de contacto con la fibra, de 33º, entre celulosa – agua, hasta 130º, entre celulosa - monoabietato de Al. Con papeles de escritura e impresión se espera valores de 90°-110°, con valores superiores la mojabilidad es mínima y la aplicación de una tinta no formaría un trazo continuo. Con ángulos menores a 90° el papel actúa como secante.

En el encolado ácido, el Al favorece la fijación de aditivos, reduce la formación de espumas, se facilita la formación de la hoja y se evita que el papel se adhiera a las prensas. Sin embargo, hay dificultad del secado de papeles offset, reacciona como envolturas de objetos metálicos, acidifica, las aguas coladas, dificultando su recuperación y aumentando el grado de corrosión del medio, incluso en el papel donde lentamente se hidroliza la celulosa.

6.6.2.2 Encolado Neutro

Las nuevas tendencias del encolado es la aplicación de resinas que trabajen en medio neutro o ligeramente alcalino. Las ventajas son el de obtener un papel más estable y durable, además de disminuir el grado de corrosión. En encolado neutro se aplican encolantes sintéticos con la ayuda de agentes de retención polielectrolíticos o poliméricos, como los dímeros de alquil ceteno, emulsiones de ceras, estearato de sodio y látex de caucho entre otras resinas químicamente inertes. En el caso de papel resistente a las grasas, se utilizan los fluorocarbonos. Tambien se puede utilizar la colofonia, empleando en este caso un complejo sulfato+resina, formado en medio alcalino, que luego es aplicado sobre las fibras. El sulfato puede ser reemplazado, parcial o total por otro catión activo; el uso del aluminato sódico, en vez del alumbre, permite neutralizar el pH a 7-7,2. El aluminato (AlO_2Na) reacciona con el sulfato de alúmina

$$(SO_4)_3Al_2 + AlO_2Na \Rightarrow Al(OH)_3$$

A pH 4,5 el $Al(OH)_3$ precipita, pero a un valor mayor solubiliza. El ión aluminato AlO es negativo y dispersa mejor las fibras y la cola; con el sulfato se añade Al que flocula la resina y el aluminato, precipitando sobre las fibras.

6.7 FABRICACIÓN DEL PAPEL

Se distinguen dos partes dentro del proceso de fabricación del papel :

- **Preparación de la pasta:** comprende la dispersión en agua, refinado de fibras, mezcla con aditivos y dilución a la consistencia de formación.
- **Formación del Papel** : etapas para convertir la pasta en una lámina de papel.

6.7.1 PREPARACION DE LA PASTA

Las fibras de pulpa son adquiridas normalmente como hojas secas (humedad 10-20%) y no pueden ser utilizadas directamente para obtener el papel; las fibras estan empaquetadas y además la forma rígida y tubular de las mismas sólo daría un papel débil de poca resistencia que incluso tendría dificultad para su formación. Por tanto, será necesario dispersar las fibras en medio acuoso y darle la forma adecuada que facilite el entrecruzamiento y formación de enlaces.

En esta primera parte, las materias fibrosas, aditivos y agua son preparados en forma adecuada de modo que la **pasta formada**, entre a la máquina papelera en forma homogénea, en condiciones óptimas de consistencia. La preparación de la pasta comprende

las siguientes etapas:

- **desintegrado**: dispersión en agua
- **tina de pasta**: almacenamiento
- **refinado** : corte y/o fibrilación
- **tina de mezcla**: mezcla con aditivos
- **depuración** : limpieza de pasta

Las etapas propuestas no representan un esquema exclusivo de preparación de la pasta; el esquema varia según el tipo de fibra empleada y el producto elaborado. Con fibras secundarias, el diagrama varia mucho, por la necesidad de mejorar la limpieza del material fibroso durante la preparación de pasta.

6.7.1.1 Desintegrado

El desintegrado no es necesario, como operación, en fábricas integradas; en este caso, la pulpa virgen proviene de la planta de pulpeo a la consistencia de 10%, y va directo a la tina de pasta.

En el desintegrado, se individualiza las fibras por la dispersión en medio acuoso a una consistencia que permite luego el transporte de la pasta por bombeo. Durante el desintegrado se prepara la pasta a consistencia media entre 5-8% y en consistencia alta 12-16%. En esta etapa se puede mezclar las fibras con aditivos, que requieren aplicación **en masa** (encolado, colorantes, microbicidas, dispersantes).

(a) Pulper

Consiste en un tanque, abierto en la parte superior, por donde se carga las fibras; para la agitación se emplea una turbina **o rotor circular**, para consistencia media, y rotor **helicoidal** para c. alta. La turbina causa dispersión de fibras por la agitación; en cambio, el rotor helicoidal provoca la dispersión por choque entre paquetes de fibras. El rotor helicoidal tiene la ventaja de causar menor daño a las fibras; se utiliza para desintegrar reciclado. En el pulper tambien se eliminan cuerdas, hilados o alambres, mediante un sistema de cadena (*ragge*r) o con trampas de rejillas metálicas.

El pulper trabaja en forma discontínua (batch) cuando dispersa pulpa virgen; cuando se utilizan fibras secundarias se opera en continuo, requiriendo equipos auxiliares como los pulpers secundarios y despastilladores.

La capacidad de un pulper standard es 900 kg de fibra **(c=6%)**[11] con 15 m^3 de volumen y potencia 110 kW; tiempos en el pulper de 15-40 min para pulpa virgen; con papel reciclado los tiempos son mayores, agregándose, en algunos casos, calor, a una temperatura mayor a 50ºC . La energía específica de desintegrado se calcula mediante la fórmula empírica:

Es = 25 + (340/V)	(kW-h/t)

V : volumen del pulper en m^3

(b) Tina de Pasta

En la tina hay dos funciones básicas:

- recibir la carga del pulper, manteniendo la pasta en movimiento;
- regular el suministro de pasta en la fábrica.

La tina se construye de concreto con revestimiento interno de loseta. La capacidad recomendada de una tina es 2 veces la del pulper (sistema discontínuo); dimensiones mayores tendrían dificultad en mantener la pasta en suspensión, razón por la que se recomienda tener 2 a 3 tinas, de ser necesario.

6.7.1.2 REFINADO

Corresponde a una operación mediante la cual se transmite energía a la pasta, modificando la morfología y estructura de las fibras.

(a) Objetivo del Refinado

El refinado se efectúa para aumentar la superficie específica de las fibras, logrando una mayor área de contacto entre ellas y por consiguiente una mayor resistencia en el papel

El refinado se lleva a cabo en un medio acuoso: el agua se encarga de la movilidad de las fibras, se incorpora a la estructura fibrosa y además sirve para disipar el calor generado en la zona de refinado.

(b) Efectos del Refinado

b.1 Sobre las fibras

El refinado modifica la estructura físico-química y morfológica de la fibra mediante la aplicación de energía; los efectos más importantes son:

(a) Hinchamiento.- Al inicio del refinado, por la energía aplicada se rompe la pared primaria de la fibra, acción que se acentúa con el tiempo de operación. De este modo se facilita el ingreso del agua hasta la pared secundaria que se hincha con mayor facilidad. Durante el hinchamiento, ingresa agua hasta saturación total de la fibra, causando un hinchamiento intercristalino, aumentando el volumen pero no es suficiente para romper la unión de los cristalitos de celulosa. La fibra en presencia de agua altera su capacidad de drenado (desgote), ingresando hasta los capilares más finos (hidratación física). La hidratación favorece la plasticidad de la fibra durante el refinado, soportando la intensidad de las cuchillas del rotor, retardando el efecto de corte.

(b) Fibrilación.- Por la energía aplicada, las fibras se fibrilan, es decir las fibrillas se liberan como filamentos,

unidos a la pared. La fibrilación puede ser:

b.1 Fibrilación Externa: ocurre con aumento de la superficie específica; hay mayor exposición de las cadenas de celulosa hacia el exterior y por consiguiente con mayor posibilidad de formación de nuevos enlaces interfibrilares. Es el efecto más deseado por los papeleros pues es el de mayor incidencia favorable sobre las propiedades de resistencia del papel.

b.2 Fibriliación Interna: hacia la parte interna de la fibra, es consecuencia del hinchamiento y la energía aplicada; hay un fibrilidado espiralado y las paredes interiores se parten longitudinalmente.

(c) Corte .- La energía de refinado y las cuchillas del rotor (aristas) someten a un debilitamiento de la pared, provocando el corte de las fibras, con la consiguiente formación de finos. El corte depende de las condiciones del refino y la calidad de la fibra. El corte será más rápido con fibras largas y rígidas.

b.2 Sobre propiedades del papel

Los efectos sobre las fibras modifican las propiedades de la pasta y del papel. Como consecuencia, en el papel se obtiene:

- aumento de la densidad;
- aumento de la resistencia (tensión y plegado);
- disminución del rasgado, por el corte de las fibras;
- disminución de la blancura y de la opacidad;
- drenado lento durante la formación del papel.

(c) Parámetros de Control de Refinado

Las fibras celulósicas al ser sometidas a la operación de refinado requieren del control de parámetros para evaluar la eficiencia de la operación refinado. Los parámetros más importantes son: drenabilidad, energía específica y temperatura.

Drenabilidad.- En base al drenado (*freeness*) de la pasta, se controla la efectividad del refinado. Los métodos mas conocidos, a nivel industrial, son el *Schopper Riegler* (°SR) y el *Canadian Standard Freeness* (°CSF).

Energía Específica.- Se evalúa la cantidad de energía de refinado por tonelada de pasta, para un rango óptimo de variación de la drenabilidad. Los valores de consumo energético dependen del tipo de pasta, de su facilidad de refinado y del valor necesario a alcanzar según el uso del papel. Con pasta kraft, para 25 ºSR, se consume de 160 - 200 kW-h/t de pasta.

(d) Refinadores

La clasificación de los refinadores se hace por la forma de sus elementos: rotor y stator. El rotor es el elemento que conduce la energía de refinado hacia las fibras y el stator es la base soporte de las fibras durante la operación. Estos elementos se componen de una serie de barras o cuchillas en la superficie de cada una de ellas, cuyas dimensiones varían de acuerdo al efecto buscado sobre las fibras. De acuerdo a estos valores se consiguen 2 efectos: fibrilación y/o corte.

	Dimensiones barras o cuchillas		
Efecto	**a**	**b**	**c**
Fibrilación	3	2	3
Standard	3	3	3
Corte	2	4	3

a: ancho de la barra; **b**: distancia entre barras; **c**: altura de la barra

De las tres dimensiones, es el valor de **a** el que más influye sobre las fibras; los valores de **b** y **c** influyen en la potencia de bombeo. A los elementos mencionados, denominados guarniciones, se construyen de diferentes materiales: de material poroso y blando (bronce) para provocar corte; para la fibrilación se utilizan materiales de mayor dureza como el acero.

Los equipos de refinado pueden ser conicos y de discos.

Refinador cónico: La forma del rotor es en ángulo cónico, entre 16° a 60°. Requiere de una circulación forzada de la pasta. El diámetro mayor del equipo varia de 500 a 1600 mm; la velocidad periférica del rotor es menor a 20 m/s. Este tipo de refinador actualmente va en desuso.

Refinador de discos: El equipo consta de dos discos, uno móvil (rotor) y otro fijo (stator). Presenta una alta capacidad de producción; los discos alcanzan 1,3 m de diámetro y la velocidad periférica en el rotor varia de 30 a 35 m/s. La potencia instalada de los motores de este tipo de refinadores alcanza los 4000 kW y la producción varia de 100 a 500 t/día de pasta refinada.

6.7.1.3 DEPURACION

Para mantener una calidad aparente superficial del papel obliga a realiza la limpieza de la pasta, mejorando la calidad final del producto y tambien de las operaciones en fábrica. En la depuración se eliminan impurezas de la suspensión fibrosa. Las impurezas presentes en la pasta pueden afectar:

- el proceso de fabricación, formando masas gelatinosas, provocando la formación de agujeros, que a su vez causa roturas del papel durante su formación en máquina;
- el acabado del papel, que a su vez genera puntos débiles, causando rotura en el papel ;
- suciedad en el papel, disminuyendo su calidad

Con pulpa virgen, el circuito de depuración se lleva a cabo a nivel de la caja de entrada; sin embargo con fibras secundarias obliga a retroceder este circuito

hasta el nivel del pulper, aumentando los costos de tratamiento en aditivos y/o equipos de limpieza.

(a) Impurezas

Es toda materia extraña, diferente a la pasta, que se presenta durante el proceso hasta producto final, causando problemas de fabricación y en el acabado del papel.

Clasificación de impurezas

(i) Por su apariencia:

- impurezas voluminosas, tamaño mayor al de la fibra (plásticos, "shives" o astillitas);
- impurezas pesadas, de peso mayor al promedio de la fibra (arena, metales);

(ii) Por su origen:

- propia de la materia prima ("shives", " pitch" o resinas)
- que acompañan a la materia prima (arena, plásticos)
- que se originan en el proceso (desgaste de tuberias, de tinas, aglomeración de aditivos mal empleados)

(b) Depuradores

Estos equipos pueden ser:

Probabilísticos, separan impurezas de un tamaño mayor al de las fibras; pueden ser:

Vibrante planos, se aplica **tamizado**, con placas perforadas de movimiento oscilatorio sobre un plano; separación de impurezas voluminosas mediante un tamiz.

Rotatorios, se aplica fuerza centrífuga en forma conjunta con operación de tamizado. La separación se realiza por diferencia de tamaño de partículas.

Dinámicos, aplica ciclonaje para separa impurezas de densidad diferente a las fibras:

Hidrociclones baja consistencia, menos de 1 %;

Hidrociclones de alta consistencia, entre 2,5 a 5 %.

b.1 Depurador vibrante plano

Ubicado a la salida del pulper; consiste en una placa perforada alojada en una base robusta, montada sobre resortes que dan movimiento sobre el plano, evitando la colmatación de la placa. Su uso permite la separación de impurezas a la salida del pulper; tiene como desventaja el contacto de la pasta con el aire. Sus principales características son: consistencia de 1-2 % (hasta 4,5 %); ciclaje 12,5 a 25 Herz; capacidad 3-90 t/24 h (caudal másico); perforaciones circulares (ϕ =1-10mm) o rectangulares (0,6-1,6 x 10 mm); potencia 1 - 3 kW.

b.2 Hidrociclones

Depurador de baja consistencia, menor a 1%, para eliminar impurezas pesadas. Este sistema utiliza un número elevado de hidrociclones instalados en paralelo. Luego de esta etapa, la pasta pasa al centricleaner. El hidrociclón puede operar en alta consistencia (3-4 %) separando impurezas pesadas de fibra reciclada. En este caso la potencia instalada varia de 2-11 kW.

b.3 Depurador Rotatorio: Centricleaner

Se ubica en circuito de máquina, antes de la caja de entrada, operando a consistencia baja (menos de 1 %). Consta de un tamiz de forma cilíndrica ubicada en el interior de una carcasa. La pasta ingresa con alimentación axial hacia el interior del cilindro y por fuerza centrífuga se desplaza a la periferie; solo las fibras atraviesa el tamiz, quedando retenidas las impurezas voluminosas. Como desventaja de este equipo esta el alto valor de pérdida de carga (pérdida de potencia). Asimismo, los rechazos, arrastran fibras en suspensión, obligando al uso de un depurador secundario.

Para evitar el colmataje interno se utilizan barras tipo martillo que generan pulsaciones de presión hacia la parte interna del tamiz, evitando que las impurezas voluminosas colmatan el tamiz.

6.7.1.4 Consistencia y Densidad del Fluído

La consistencia (c %) es la relación de la masa de sólidos respecto a la masa total de la pasta. La masa de sólidos corresponde a fibras celulósicas+aditivos que se **dispersan** en el medio acuosos de **dispersión.** La fórmula empírica de la consistencia es:

$$\mathbf{c\ \%} = \frac{wF}{wF + wA} \times 100$$

wF masa de fibras (sólidos); wA masa de agua

A partir de c% se estima la **densidad del fluido** o densidad de pasta (ρ), según el siguiente análisis:

En una mezcla de 100 se tiene:

	sólidos	**líquido**	**mezcla**
Masa	**c**	**100-c**	**100**
Densidad	$\rho_s = (c/V_s)$	$\rho_l = (100\text{-}c)/V_l$	$\rho_m = (100/V_m)$
Volumen	$V_s = (c/\rho_s)$	$V_l = (100\text{-}c)/\rho_l$	$V_m = (100/\rho_m)$

Sabiendo que $V_m = V_s + V_l$ entonces

$$\frac{100}{\rho_m} = \frac{c}{\rho_s} + \frac{100-c}{\rho_l}$$

despejando ρ_m, densidad de la pasta

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{c}{\rho_s} + \frac{100-c}{\rho_l}}$$

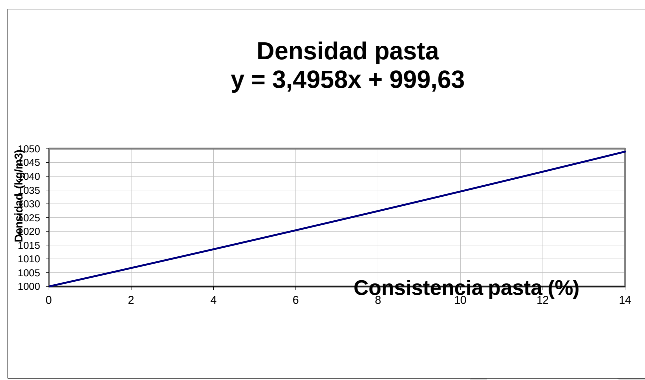
dando valores aproximados

densidad de la celulosa $\rho_s = 1500$ kg/m^3
densidad del agua $\rho_l = 1000$ kg/m^3

la fórmula se simplifica:

$$\rho_m = \frac{300}{300-c\%} * 1000 \quad (kg/m3)$$

Una relación gráfica entre los valores de consistencia y



densidad es mostrada en la figura .

Valores de Consistencia en Caja para Diferentes Tipos de Papel

Offset	1,1	Cartón corrugable	0,9
Bond	0,9	Cartón liner	0,6-1,0
Periódico	0,7	Papel kraft	0,3-0,6

La consistencia corresponde a la pasta en la zona de entrada del depurador y ubicado cerca a cabeza de máquina, siendo la consistencia de formación.

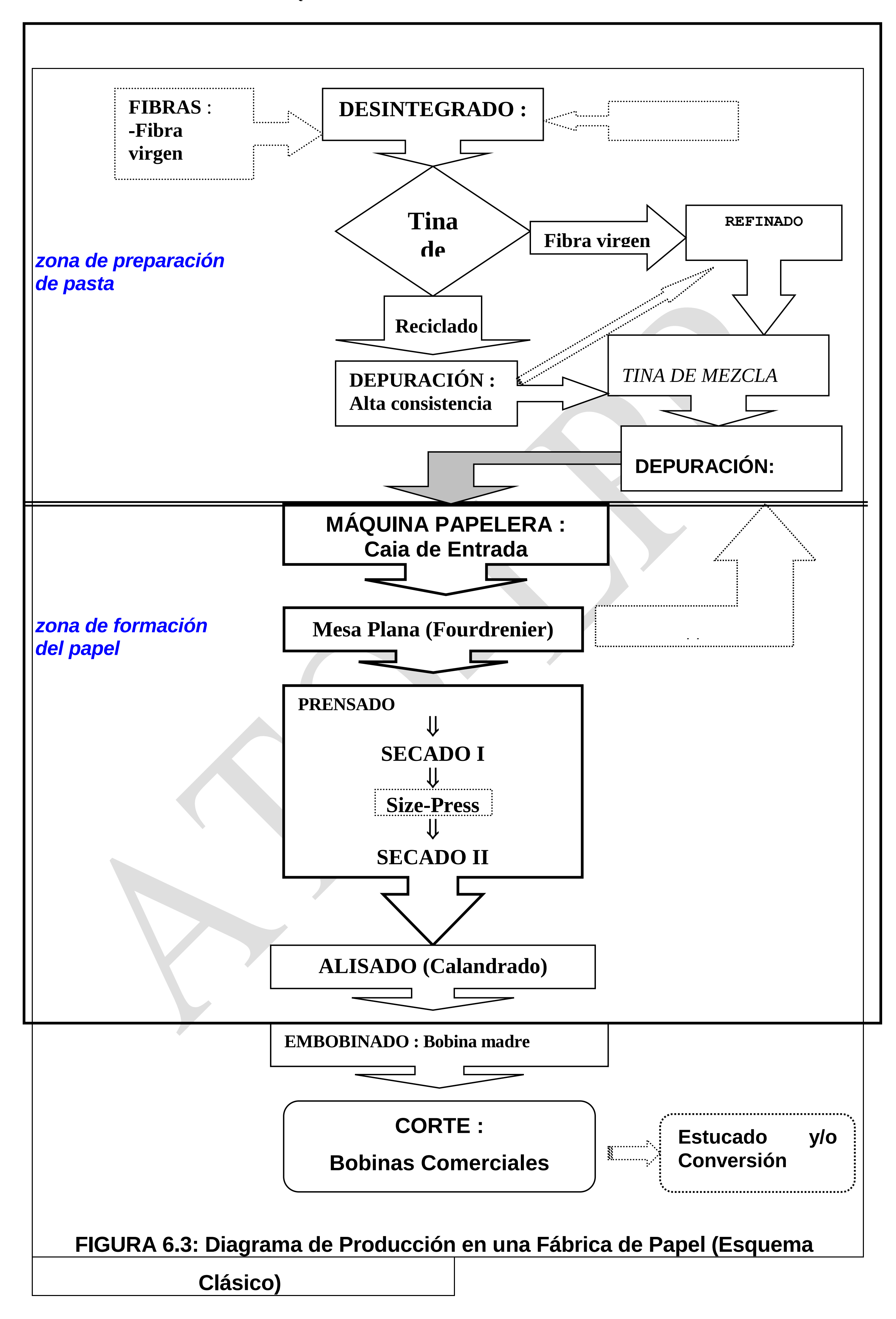


FIGURA 6.3: Diagrama de Producción en una Fábrica de Papel (Esquema Clásico)

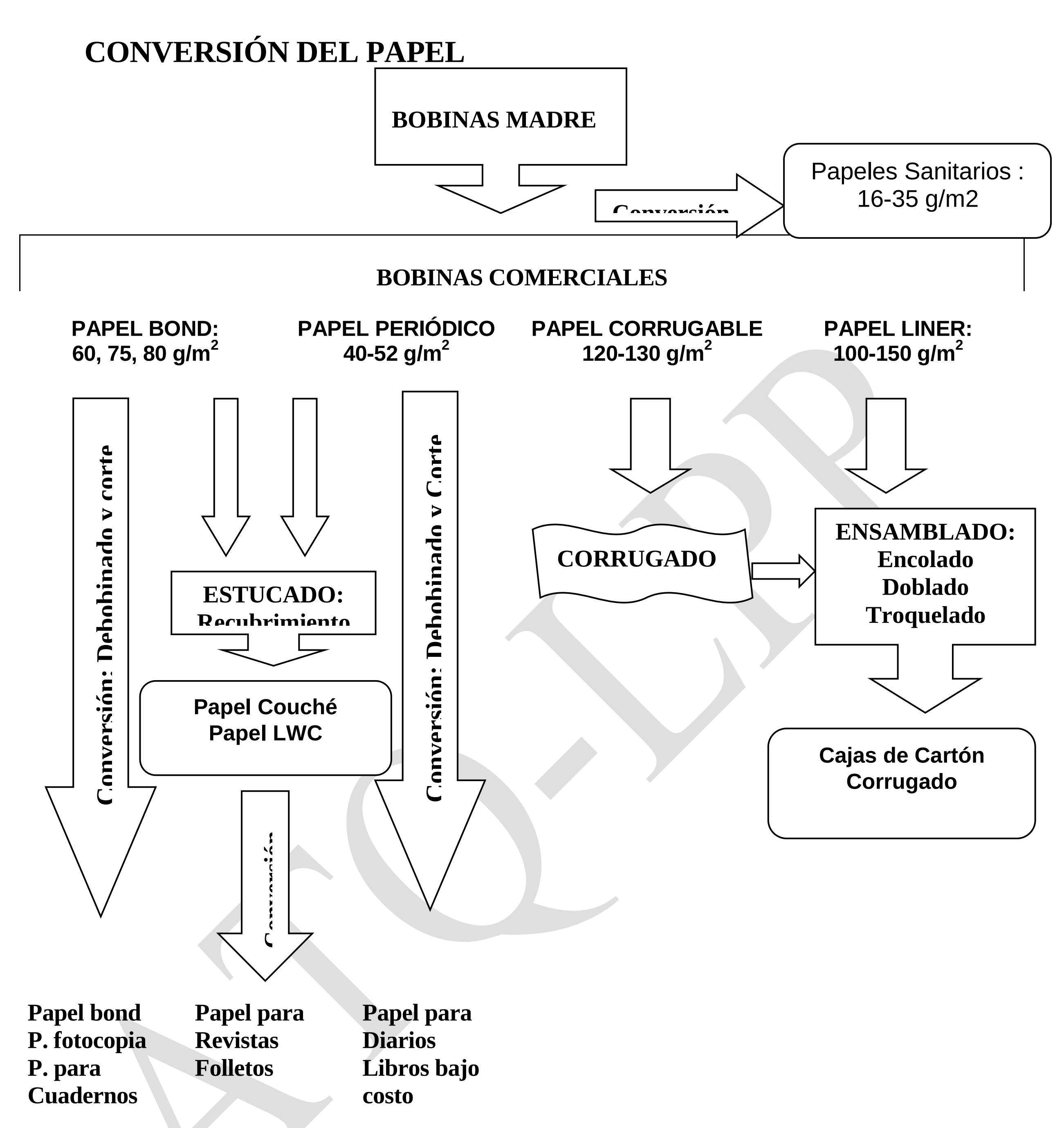


FIGURA 6.4: Diagrama de Conversión de Diferentes Tipos de Papel

6.7.2 FORMACION DE PAPEL

La pasta preparada se traslada a través de tuberias hacia la zona de formación del papel. La pasta se recibe en cabeza de máquina papelera(***headbox***), a una consistencia adecuada, 0,2 a 1,5 % y de aqui es distribuida a la zona de formación, de donde se traslada en forma de hoja contínua al prensado y secado, obteniéndose un papel con una humedad de 5-7%. En la preparación de la pasta, fibras y aditivos se encuentran dispersos y en la formación del papel se reagrupan bajo forma laminar. La formación del papel a partir de la pasta, comprende las siguientes etapas:

- caja de entrada o de distribución de pasta
- mesa de formación de la hoja
- prensado de la hoja, para eliminar del agua libre
- secado, para eliminar agua fuertemente retenida
- alisado, para mejorar lisura y suavidad del papel
- embobinado, de la banda contínua del papel

6.7.2.1 CAJA DE ENTRADA (*HEADBOX*)

La caja de entrada es posterior a un circuito de regulación de consistencia y de la depuración. En la caja o cabeza de máquina se reparte un flujo contínuo de pasta, en forma homogénea y constante, hacia la mesa de formación: la repartición de la pasta es homogénea a lo ancho de la mesa, en el tiempo. La caja contiene un dispositivo que regula y uniformiza la velocidad de salida, evitando la turbulencia o formación de vórtices. El flujo contínuo garantiza la formación de una hoja homogéenea sobre la mesa. La caja en su parte superior es abierta o cerrada (con una capa de aire a presión). La consistencia de salida va de 0,2-1,5%. En la cabeza de máquina se distinguen tres partes generales:

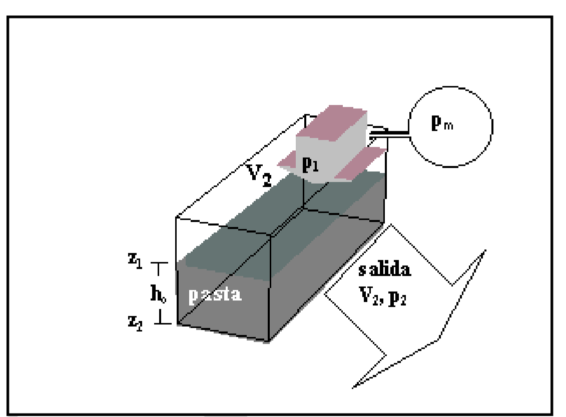
- Un repartidor (manifold) que cambia el flujo del caudal de pasta de forma circular a rectangular;
- Dispositivo de igualación de velocidad, que regula la pasta y uniformiza la velocidad de salida sobre la mesa;
- Regulador en caja, se compone de (a) cuerpo en caja para mantener flujo uniforme y en suspensión; (b) par de reglas paralelas (*slice*) regulables.como abertura de salida de la pasta.

6.7.2.1.1 Velocidad de la Máquina

La velocidad de la máquina papelera esta definida por la velocidad de salida de la pasta de la caja sobre la zona de formación. Asimismo, los cálculos de producción de la fábrica de papel estan en función de la velocidad de la máquina papelera. Un esquema de la caja y los elementos que intervienen en el cálculo de la velocidad se muestra en la figura 6.5, tomando como base la ecuación general de balance de energía en la caja de entrada.

FIGURA 6.5 : Parámetros dentro de una Caja de Entrada

Ecuación General de la Energía (Bernoulli):



$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_w + h_f$$

- **z_1 , z_2**: cotas, superior e inferior, de pasta en caja;
- **p_1**, presión absoluta dentro de caja (kg/cm²)
- **p_2**, presión absoluta en salida de caja (kg/cm²).
- **V_1**, velocidad de pasta en cota z_1. A las condiciones de pasta dentro de caja, $V_1=0$
- **V_2**, velocidad de pasta en la cota z_2 (m)
- **ρ**, densidad de pasta ($\rho \approx 1000$ kg/m³)
- **g**, aceleración de la gravedad (9,80665 m/s²)
- **h_w**, potencia de bombeo
- **h_f**, pérdida por fricción de pasta dentro de caja

Los valores de la fórmula se relacionan como sigue:

- La diferencia de cotas, o altura de pasta (**h_o**) dentro de la caja es:

$$z_1 - z_2 = h_o \quad \text{(m)}$$

- Se sabe que, por definición, la presión absoluta ($P_{abs.}$) es :

$$P_{abs.} = p_{atm} + p_m$$

siendo p_m, presión manométrica (kg/cm²)
p_{atm}, presión atmosférica (kg/cm²)

- A la salida de la caja, la pasta entra en contacto con la presión atmosférica ($P_{atm.}$) y por consiguiente el valor de p_2 es igual a la presión atmosférica

$$p_2 = P_{atm}$$

- De la relación anterior, las expresiones de presión se resumen en:

$$p1 = P_{abs} = p_2 + p_m$$

- h_w y h_f son valores despreciables en el sistema (h_w y $h_f \approx 0$)

6.7.2.1.2 Caso de Máquina con caja abierta

En cajas abiertas, la única presión que se aplica sobre la pasta es la presión atmosférica, no existiendo ningún otro tipo de energía adicional en el punto de salida. Por consiguiente, la presión manométrica es nula (p_m=0) y la presión ejercida sobre la pasta es igual a la presión atmosférica (p_1=p_2); la ecuación queda como sigue:

- $$z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$
- $$z_1 - z_2 = h_o = \frac{V_2^2}{2g}$$

luego, velocidad de máquina $V_2 = (2gh_o)^{1/2}$

A la salida de la caja, en la zona del *slice*, la pasta sufre una pérdida de velocidad por efecto de contracción del volúmen del fluido y por consiguiente la velocidad real (***v***) de la pasta es menor a V_2; sin embargo:

$\boldsymbol{v}/V_2$ = constante = k

Finalmente, la velocidad real en la máquina es:

$$\boldsymbol{v} = k\,(2gh_o)^{1/2}$$

el valor k de es siempre menor a 1 (k<1). En cajas abiertas, los valores k varian entre 0,6 a 0,8.

En fábricas de papel con este tipo de cajas, el valor h_o varia de 0,6 a 1-2 m, no pudiendo ser mayor, limitando la velocidad de la máquina. Valores altos de h_o causan dificultades en el control de la consistencia dentro de caja y a la salida de la pasta, generando problemas de mala formación del papel e irregularidades en el gramaje y en el espesor.

6.7.2.1.3 Caso de Máquina con caja cerrada

Con el fin de aumentar la velocidad, evitando utilizar un valor elevado de h_o, las cajas son cerradas, permitiendo la aplicación de una presión adicional en el sistema, aparte de la presión atmosférica. La presión adicional, registrada por un manómetro, tiene una equivalencia en altura hidráulica dentro de la caja. En la caja cerrada en la parte superior, se ejerce una presión de aire homogénea sobre toda la pasta. La presión de aire es registrada como la presión manométrica, por consiguiente $p_m \neq 0$. Recordando que: V_1=0; $p_1 - p_2 = p_m$ y

$p_1 = p_2 + p_m$ = P atmosférica + p_m

La ecuación general queda como sigue:

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$\frac{(p_1 - p_2)}{\rho} + (z_1 - z_2) = \frac{V_2^2}{2g}$$

Sabiendo que $z_1 - z_2 = h$

$$\frac{p_m}{\rho} + h_o = \frac{V_2^2}{2g}$$

La relación p_m/ρ se define como la altura equivalente de la pasta = h_1, y en la ecuación:

$$h_1 + h_o = H = \frac{V_2^2}{2g}$$

los valores de h_0 se interpreta como la altura de pasta o columna de agua en la caja y h_1 es la altura de agua equivalente por presión de aire.

Luego, despejando el valor de velocidad

$$V_2 = [2g * (H)]^{1/2}$$

Al igual que el caso anterior, la velocidad real esta afectada por la constante k:

$$\boldsymbol{v} = k\,[(2g*(H)]^{1/2}$$

el valor k en cajas cerradas varia de 0,85-0,95.

Estimación de h_1 (altura equivalente de pasta)

Del análisis de unidades en la relación h_1

$$h_1 = \frac{p_m}{\rho} = \frac{(kg/m^2)}{(kg/m^3)} = (m)$$

Una manera práctica de hallar la altura equivalente se hace a partir de la estimación de la presión

ejercida por $1000cm^3$ de agua sobre un área de 1 cm²:
Sabiendo que $\rho = 1000\ kg/m^3 = 1 kg/10^{-3}m^3$;
La presión será igual a $1\ kg/cm^2 \approx 1\ kg/10^{-4}m^2$

Dividiendo ambos valores

$$\frac{1\ kg/10^{-4}m^2}{1kg/10^{-3}m^3} = \frac{10^{-3}m^3}{10^{-4}m^2} = 10\ m$$

Siendo la presión equivalente de 1 kg/cm² equivalente a la presión de una columna de agua de 10 m de altura. De manera análoga:

1 kg/cm² = 10 m
0,8 kg/cm² = 8 m
0,5 kg/cm² = 5 m
0,2 kg/cm² = 2 m
0,1 kg/cm² = 1 m
0,05 kg/cm² = 0,5 m
1atm = 1,033 kg/cm2 = 10,33 m

nota: el valor de columna de agua, cuyas unidades expresadas en metro (m), tambien se expresa como metro de columna de agua (m.c.a.).

6.7.2.1.4 Cálculo del Gramaje del Papel

El gramaje del papel a fabricar esta en función de la consistencia de la pasta en la caja, de la velocidad de la máquina.

$$(Q_v) = v * A_b * e \quad (m^3/min)$$

Q_v caudal volúmico
A_b ancho de mesa o ancho bruto de la hoja (m)
e espesor del slice (m)
v velocidad de la máquina (m/min)

Para calculo del gramaje se debe estimar la fracción de sólidos por unidad de tiempo que sale de la caja. Esta fracción, denominada caudal másico (Q_m) se estima a partir de Q_v, de la consistencia (c%) y de la densidad de la pasta (ρ):

$$Q_m = Q_v * (c\%/100) * \rho$$

Q_m caudal másico (kg/min)
Q_v caudal volúmico (m³/min)
ρ densidad de pasta (kg/m³)
c% consistencia de pasta, variable de 0,2-1,5 %

El valor ρ se puede calcular a partir de la fórmula del pto. 6.7.1.4; sin embargo, para los bajos valores de consistencia se asume que $\rho \approx 1000$ (kg/m3). Luego reemplazando Q_v:

$$Q_m = (v * A_b * e) * c\% * 10 \quad (kg/m^3)$$

Por otro lado, se debe estimar el área que se forma (a_f) sobre la mesa por unidad de tiempo.

$$af = v * A_b \quad (m^2/min)$$

Y el gramaje del papel, base seca (G_s), se estima por la relación: $G_s = Q_m/a_f$. Simplificando las fórmulas

$$G_s = (e * c\% * 10) = (kg/m^2) \times 1000 = (g/m^2)$$

6.7.2.2 ZONA DE FORMACION

Normalmente la zona de formación del papel es la mesa plana (mesa *Fourdrenier*); las fibras dispersas en medio acuoso salen a una determinada velocidad desde la caja y caen sobre la mesa. La mesa esta cubierta por una tela, metálica o de plástico, con una abertura óptima (80-120 mesh) que permita la retención de fibras; el agua drena através de la tela y es nuevamente utilizada para dilución y regulación de consistencia (circuito de aguas blancas). Durante la formación, las fibras se entrecruzan y forman una banda húmeda contínua. Sobre la mesa de formación, se distinguen dos zonas de drenado (ver figura):

(a) **primera zona,** próxima a la caja de entrada, hay filtración debido a una depresión (diferencia de presión entre ambas caras de la tela), que es función de la velocidad, provocada por los **foils** o rodillos desgotadores. El drenado se genera por vacío natural que se manifiesta mientras aparezca una capa continua de agua sobre la tela, que corresponde a una capa con brillo resaltante visto desde una parte superior;

(b) **segunda zona**, se inicia luego que desaparece el brillo, apareciendo como límite una **línea seca** y a partir de este momento se requerirá de un mayor esfuerzo para el drenado del agua. El aumento del valor de la depresión se logra por aplicación de vacío artificial, mediante **cajas de succión**; los elementos de drenado son las cajas aspirantes o cajas de vacio. Al final de esta 2da zona, el papel sale con una consistencia de 20-25%.

Además, en la mesa de formación, existe:
El traqueo, movimiento de vaivén transversal de la mesa, con el fin de lograr un acomodo de las fibras y formación homogénea, evitando la floculación de la pasta. Este sistema corresponde a máquinas de diseño antiguo.
Rodillo desgotador (rodillo *dandy*) homogeniza el

lado superior de la hoja permitiendo una mejor repartición de los finos y cargas en el papel. Este rodillo tambien se utiliza para la aplicación de las filigranas y marcas de agua.
Prensa de goma (matapegotes o *lumpbreaker*) se ubica al final de la mesa, sobre el cilindro de transferencia (c. aspirante) y tiene como función consolidar la hoja al final de la mesa.
Cuchillas de agua, a presión, para cortar los extremos laterales de la hoja al final de la hoja, permitiendo un borde regular del papel en sus extremos. Los recortes de la hoja se recuperan y son enviados a un circuito de recuperación de fibras.

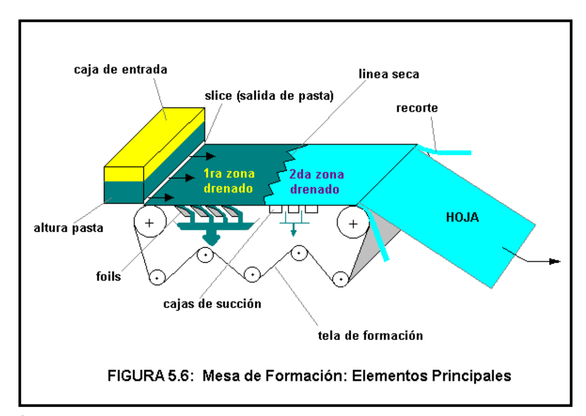


FIGURA 5.6: Mesa de Formación: Elementos Principales

La transferencia de la hoja a la siguiente etapa, de prensado, se hace por suspensión de la hoja libre en aire o utilizando una tela fieltro.

6.7.2.3 PRENSADO

Luego de formada la hoja, esta se transfiere a la sección de prensado. La hoja ingresa con una consistencia de 20-25%. Con el prensado se busca eliminar el agua libre de la hoja, elevando la consistencia a 40-45%, consolidándose la hoja. Durante el prensado las fibras se aplastan, reducen el volumen y aumenta el contacto interfibrilar, favoreciendo la formación de enlaces. Un buen prensado brinda resistencia en húmedo a la hoja, facilitando la corrida a la siguiente etapa. Los objetivos del prensado son los siguientes:

- extracción del agua libre de la hoja húmeda;
- consolidación de la hoja: el mayor contacto de fibras favorece las uniones interfibrilares.
- mejorar las propiedades de suavidad, densidad y resistencia en húmedo.

Por efecto de la presión aplicada, se provoca la rotura de la estructura de la hoja: un presión excesiva puede destruir la hoja con síntomas en el aumento de finos y presencia de fibras en los fieltros.

El prensado se realiza en continuo y el agua que se elimina de la hoja fluye por su red capilar. El desplazamiento del agua de la hoja hacia fieltro debe ser perpendicular y mínimo en dirección transversal; un flujo perpendicular favorece el contacto entre las fibras. En un buen prensado se tiene en cuenta lo siguiente:
- el transporte de la hoja la hace el fieltro, que además recibe el agua eliminada, evitando roturas por tensión en la hoja húmeda.
- la remoción del agua debe ser uniforme através de todo lo ancho de la máquina.

La eficacia del prensado influye en la economía de energía; la sequedad de entrada es 20-25 % y a la salida 30-40%. Un estimado de eliminación de agua, 2,5 m^3/t, evalúa la importancia del prensado. Nuevas tecnologías del prensado permiten alcanzar una sequedad de salida del 50%, (3 m^3/t) con los consiguientes beneficios de costo del secado.

La operación del prensado requiere de los siguientes elementos:
la tela fieltro que transporta la hoja húmeda durante esta etapa;
los rodillos prensa, de superficie lisas, ranuradas o con cajas ade vacio, capaces de aplicar una presión elevada sobre la hoja (15 a 110 kN/m).

6.7.2.3.1 Fases en el Prensado

Según lo propuesta por *Wahlstrom*, se identifican las siguientes fases:

I Se inicia la compresión; con desplazamiento de aire y sin presión hidráulica

II Hay saturación de la hoja y la presión hidráulica causa movimiento de agua de la hoja al fieltro;

III La presión total sobre la hoja es máxima, con máxima sequedad; la presión del fluido en la hoja es 0;

IV Se expande el fieltro y la hoja, pero se crea una presión hidráulica negativa en ambas estructuras; hay un flujo de retorno de agua desde el fieltro hacia la hoja, lo que se corrige utilizando un fieltro muy permeable. Sin embargo la reabsorción de agua por la hoja sera siempre una desventaja.

Según el esquema de prensado, el cilindro rotatorio esta cargado mecánicamente en los extremos para ejercer una presión lineal. A continuación se menciona valores de operación de prensado en dos tipos de papel:

PARÁMETRO	Escritura e impresión	Embalaje

carga lineal	20-120 kN/m	<300 kN/m
ancho nip	1,5 - 7 cm	1,5 - 7 cm

6.7.2.3.2 Circuitos de Prensado

La eficiencia del prensado aumenta con el número de prensas; es común utilizar 2-3 prensas dependiendo del tipo de papel. A continuación se observa como varia la sequedad de la hoja en circuitos de 2 prensas:

Circuito	% sequedad
entrada	18 - 25
salida 1ra prensa	29 - 37
salida 2da prensa	35 - 44

se elaboran principalmente con material sintético. En la industria papelera se utilizan fieltros agujados simples, sin tramas y combinados. Tiene una base, cañamazo, que le da resistencia en sentido transversal y evita su encogimiento. La vida útil del fieltro se mide por la producción de papel; constantemente requiere de un lavado a alta presión.

6.7.2.4 SECADO

Es la última etapa importante en la fabricación del papel. El secado se produce por contacto de la hoja con la superficie de un cilindro, que internamente contiene vapor sobrecalentado. Esta etapa se realiza en baterías multicilíndricas, que en conjunto son de 40-60 cilindros; cada cilindro tiene de 1-1,5 m de diámetro, según el gramaje del papel. Sólo en el caso de papeles tissue, se utiliza un solo cilindro de secado (modelo *yankee*) de 2,5-4,5 m de diámetro. La temperatura máxima de secado es 120-130 °C y el consumo de vapor 1,15-1,4 kg vapor/kg agua evaporada (índice de eficiencia). La eficacia del secado varia según el equipamiento utilizado en esta operación: campanas extractoras de vaho, extracción de condensados del cilindro, etc.

Con el secado se busca disminuir la humedad de la hoja: de 60% a 5-7% en promedio. Durante el secado, la hoja esta contacto con la superficie de hierro fundido, de los cilindros calentados internamente con vapor. El diámetro de los cilindros varia de 1,22 a 1,52 m (Libby-1968). Smook (1983) menciona que durante el secado se debe evaporar la humedad residual de la hoja prensada, con un gradiente eficiente y con un bajo consumo de vapor. Se menciona que el secado es la parte mas cara de la máquina papelera, con referencia a los costos de capital, de operación y unitarios. Al respecto, Britt (1970) señala que el costo de secado es en promedio 7 veces más caro que el costo del prensado, lo que es motivo para mejorar su eficiencia; sin embargo no siempre se toma el interes necesario, lo que se traduce en pérdidas.

Hay tres criterios importantes para la evaluación del secado: tasa de evaporación, economía de vapor y uniformidad de secado. La evaluación numérica se hace a través de los siguientes indices:

tasa de secado: kg papel secado/h*m^2 de superficie de contacto.

tasa de evaporación: kg agua evap./h*m^2 de superficie de contacto

economía de vapor: kg vapor/kg agua evaporada.

Los índices anteriores son importantes para hallar el número de cilindros en un tren de secado. En el caso de la tasa de evaporación un valor promedio es 9,8 kg agua/h*m^2 (2 lb agua/h*pie^2) en cilindros normales, pero en cilindros Yankee este valor varia de 49-98 kg agua/h*m^2 (10-20 lb agua/h*pie^2). Los valores de la tasa de evaporación estan en función de la presión de vapor, del tipo de papel y de la humedad final deseada.

Durante el secado, se distinguen cuatro etapas:

(I) contacto hoja/tela , con mala transferencia del calor, hay un aumento de temperatura en la hoja pero no hay evaporación;

(II) la de mayor tiempo de duración; hay buen contacto del papel con el cilindro y disminuye la película de aire entre ambas; se eleva la temperatura en la hoja pero sin buena evacuación de vapor;

(III) disminuye la temperatura en la hoja pero se inicia la evaporación;

(IV) hay evaporación de agua por ambas caras de la hoja; corresponde a una distancia de recorrido libre de 1 a 1,25 m. Con el diámetro del cilindro aumenta la distancia libre en esta fase.

La hoja húmeda se pasa por los cilindros y mantenida en contacto con la superficie calentada, con ayuda de telas. El número de cilindros esta influenciada por el gramaje, cantidad de agua a evaporar, velocidad de la máquina y la presión de vapor. Un tren de secado normal puede constar de 40 a 70 cilindros, dividida en 2-5 secciones.

6.7.2.4.3 Características de un cilindro standard

Hecho de hierro fundido y para el caso de alta presión, hecho de acero. Su acabado es pulido en la superficie; ocasionalmente se instala láminas (*blade doctor*) para limpiar la superficie de impurezas que reducen la calidad e interfieren en la

conducción del calor. El *blade doctor* es una lámina de acero de textura, flexible, que no causa desgaste de la superficie del cilindro.

Transferencia del calor .- Se introduce vapor a tráves de una chumacera hueca por donde fluye el vapor de entrada y los condensados de salida. La cantidad de calor aplicada depende de: gramaje, sequedad de entrada, coeficientes de vapor, m^2 superficie de contacto, características de fibras, refinado, # cilindros, velocidad de máquina, y eficiencia de ventilación del sistema.

Secado por contacto.- la evaporación ocurre por contacto de la hoja con el cilindro. Luego de la transferencia de calor, el vapor sobrecalentado al interior del cilindro se transforma en condensado, que forma una película junto con los óxidos en la pared interna. Al exterior, se forma una capa de aire entre el papel y el cilindro lo que se evita por aplicación de una tensión alta en la tela.

Bateria de secado.- Es el conjunto de cilindros alimentados por vapor a igual presión y temperatura e igual accionamiento. El conjunto de baterias forma el tren de secado.

La tendencia actual en las tecnologías de secado es la mejora de la eficiencia utilizando para el efecto: campanas extractoras, técnicas de secado transversal, secado de paso recto usando aire a alta velocidad, secado en lecho fluido, secado con microondas e infrarrojos. De otro lado, para cumplir funciones específicas se utilizan los siguientes equipos incorporados en la sequería: satinado, humedecedor, y de size press.

6.7.2.7 SIZE PRESS

Es un tratamiento superficial aplicado sobre la hoja, que se ubica entre cilindros secadores. Este tratamiento, tambien denominado encolado superficial; se efectúa con el fin de: **(i)** aplicar productos de encolado para mejorar la cohesión de las fibras en direccion Z; **(ii)** para coloración de una o ambas caras, evitando problemas de color en el circuito; **(iii)** para aplicar una capa de pre-estucado. En el size press se utilizan como sustancias de aplicación soluciones de almidón catiónico, CMC, colorantes ópticos. La presencia de este tratamiento esta condicionado a ciertos tipos de papel.

6.7.2.8 ALISADO

A la salida del secado, la hoja seca pasa através de una serie de cilindros metálicos con superficie pulida, alisando una o ambas caras del papel, por fricción. Se utiliza una serie de 2 a 10 cilindros alisadores que se ubican al final de la máquina papelera. La ubicación de los cilindros de satinado, ubicada antes del size press, suele ser confundida a veces con el alisado. Además, la presión aplicada en alisado es mayor a aquella aplicada durante el satinado.

6.7.2.9 EMBOBINADO

Durante esta etapa se recepciona el papel alisado, bajo la forma de una bobina madre de donde pasará a una máquina debobinadora-bobinadora, durante la cual se efectuará un corte a lo largo del papel con el fin de obtener una bobina con un tamaño comercial y fácil manipulación para el transporte.

6.7.2.11 CONVERSIÓN

La conversión del papel es un conjunto de operaciones hechas sobre las bobinas comerciales preparándolas para consumo final: estas operaciones son principalmente de corte, doblado, etc; en la mayoria de los papeles de escritura e impresión, las bobinas comerciales son transformadas, por corte, en resma que es un conjunto de hojas de dimensión 1270 x 1270 mm (50 x 50 pulgadas).

6.7.2.12 ESTUCADO

El estucado es un recubrimiento (*coating* o *couchage*) efectuado sobre una o ambas caras del papel; este recubrimiento se compone de una capa de pigmentos y ligantes (naturales o sintéticos). El objetivo del estucado es aumentar o mejorar las características superficiales de los papeles: suavidad, brillo, blancura y opacidad, mejorando tambien el comportamiento del papel durante la impresión. Entre los pigmentos utilizados se encuentra el dióxido de titanio y el caolín; como pigmentos se utiliza látex sintéticos y caseína.

6.8 PRODUCCIÓN EN MÁQUINA PAPELERA

La producción (**P**) de una máquina de papel esta en función de los siguientes parámetros:

P = f (***v***, A, T, G)

- ***v*** velocidad de la máquina papelera (m/min)
- A ancho neto del papel a la salidad de la mesa, sin recortes (m). El ancho neto varia de 2 a 6 m, incluso hay casos de hasta 9 m. El ancho neto de la mesa corresponde al largo de la bobina madre.

$$A = \text{Ancho bruto} - \text{recortes} = A_b - 2r$$

- r: recortes en extremo al final de la

mesa (r=2-5 cm)

- T tiempo de trabajo de la máquina, suele ser en producción contínua de 24 horas/dia (1440 min) y anualmente de 300 a 330 días. Los tiempos muertos corresponden a paras para mantenimiento y/o cambio de producción en la máquina.
- G gramaje del papel, sea base seca o base acondicionada (g/m^2). Esta en función de la consistencia de la pasta que ingresa a la caja de entrada. La consistencia varia de 0,3 a 1,5%.

La producción es expresada finalmente en toneladas métricas por dia (t/día).

6.9 CLASIFICACIÓN DEL PAPEL

Existen diversos criterios de clasificación del papel; sin embargo los criterios de gramaje ,por uso final y por acabado se consideran entre los mas importantes.

6.9.1 Clasificación por Gramaje y Espesor

Tomando como referencia la norma NTP, se distinguen dos clases:
Papel, con gramaje menor a 224 g/m²
Cartón, con gramaje mayor o igual a 224 g/m²

Un caso particular es considerado en la denominación cartulina: según NTP, se acepta esta denominación para papeles con un gramaje entre 150 y 224 g/m².

En el caso del espesor, la diferencia es:
Papel, espesor menor a 3 mm
Cartón, mayor o igual a 3 mm

6.9.2 Clasificación por el Uso Final

Según el uso final que se le de al papel o cartón, estos pueden ser clasificados como sigue:

Papeles de escritura e impresión: requiere de características específicas de blancura, opacidad, suavidad, resistencia a la tensión, al plegado y al rasgado; ejm: papel periódico, papel bond.

Papeles Sanitarios: con requisitos de blancura, resistencia a la tensión, resistencia en húmedo, cuerpo; sobre este tipo de papeles se efectuan análisis de control microbiológico. Ejm: papel higiénico, servilletas, p. toallla, papel tissue.

Papeles y Cartones de Uso Industrial: son papeles con requerimentos principalmente en resistencia. Este grupo incluye los papeles para bolsas y sacos, papeles de envolturas de productos, papel liner y corrugables para cajas de cartón. Las propiedades de resistencia a la tensión, reventamiento y rasgado, alargamiento y absorción de energía por tensión (TEA) son requisitos importantes de los papeles para sacos y liner; en papel corrugable se requiere además rigidez; en envolturas de alimentos y productos grasos se evalúa el requisito de permeabilidad a los fluídos.

Cartones multicapas: corresponde a un cartón conformado por 2 o más capas de papel que se han unido por prensado húmedo. Este grupo comprende los denominados cartón duplex, cartón paja, cartón de empaste, etc.

Papeles para construcción: es una clase de papel, de poco uso en nuestro medio, pero muy utilizado en la industria de la construcción en otros países. Este papel actúa generalmente como un soporte de un material que aporta una característica de impermeabilidad o aislamiento. Ejemplos dentro de este grupo se mencionan al papel asfalto, papel vinílico, cartón aislante, etc.

Papeles especiales: en este caso, el papel elaborado presenta una característica específica que define su uso, requiriendo una condición especial durante su fabricación. Como ejemplos en este grupo se menciona el papel para condensadores, que no debe presentar electrolitos dentro de su composición; su fabricación requiere una especial preparación de la pasta con agua desionizada. Otros ejemplos: papeles de filtración (con porosidad especial y sin cenizas); papeles fiduciarios y papel moneda ; papel carbón, etc.

6.10 MERCADO DE PAPEL EN PERÚ

El papel es un producto de gran importancia y su consumo se relaciona con el grado de desarrollo económico y cultural de un país; se consume de diferentes maneras, como papeles y cartones para envases y embalajes, como papeles para escritura e impresión, en cuadernos, libros, revistas, diarios,etc. ; tambien como papeles sanitarios (higiénico, toalla, servilletas) y papeles especiales (base de p. carbón, p. para condensadores, etc.).

A nivel mundial, en los países desarrollados existe un consumo percápita anual entre 180 a 250 kg de papel ;en cambio, en los paises de América Latina el consumo medio es de alrededor de 20 a 25 kg. En el caso del Perú el consumo ha descendido en los últimos quince años, de 12 a 8 kg por razones ya conocidas. Sin embargo, el resurgimiento de la economía prevee una mayor demanda, que puede llegar a compararse al promedio de la región.

Frente a una mayor demanda nacional, se estima que se acentuaría la escasez de fibras para papel (**pulpa**) de producción nacional, que en la actualidad sólo

utiliza el bagazo de la caña de azúcar; por lo antes mencionado, se deberá recurrir a una mayor importación de pulpa , con los consiguientes egresos en divisas. Por esta razón, se deben intensificar los estudios para un mayor aprovechamiento de los recursos fibrosos, tales como madera y residuos agrícolas, los que mejor administrados servirían para sostener una industria nacional de pulpa para papel , con capacidad para satisfacer al mercado nacional y con posibilidades de exportación.

6.10.1 LA INDUSTRIA PAPELERA PERUANA

La primera fábrica de pulpa para papel en el Perú se instalo el año de 1939 en la localidad de Paramonga, 200 km al norte de Lima, perteneciente entonces a la W. R. Grace & Co. ; se emplea el proceso químico a la soda, empleando como materia prima el bagazo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) residuo de los ingenios azucareros en el Norte del Perú. Posteriormente, en 1950 se instala la Cia. Celulósica y Papelera del Norte, Cayaltí - Lambayeque y por último hacia el año de 1968 la Cia. Papelera Trujillo (TRUPAL) en Santiago de Cao, La Libertad; ambas fábricas tambien utilizan como materia prima el bagazo de la caña , con el proceso de pulpeo a la soda. Se estima que las tres fábricas tenian una capacidad instalada de 311 000 TM/año. Sin embargo la producción de este tipo de pulpa fue, en 1990, de alrededor de 60 mil TM, entre pulpa blanqueada y sin blanquear (**cuadro N° 1**), lo que representa algo menos del 20 por ciento de la capacidad instalada.

Las principales razones de la disminución en la producción nacional de la pulpa de bagazo de caña de azúcar fueron las siguientes:

(1) alto precio del bagazo, con equivalente al poder calórico del petróleo. La tonelada de bagazo se cotiza entre 60 a 80 dólares US (varía según la humedad y el porcentaje de fibra); en el caso de madera , el precio por tonelada 25 -40 $US (Brasil y Colombia), y 45 a 55 $US (Chile).

(2) dependencia total del terceros en el abastecimiento; las tres fábricas de pulpa son administradas por Sociedad Paramonga Ltda. , empresa estatal del sector químico, que se dedica a la producción de pulpa y papel, además de sus plantas de álcalis, alcohol y PVC. SPL adquiere todo el bagazo a las cooperativas azucareras quienes controlan el precio de la materia prima.

(3) menor calidad de la pulpa de bagazo comparada con la pulpa de madera; en el mercado local para la mayoría de los papeles producidos se encuentra un mejor comportamiento con las fibras madereras.

(4) tecnología obsoleta en cuanto al proceso de obtención de pulpa. SPL, en Paramonga, utiliza equipos que en la mayoría de los casos tienen más de 30 años de antigüedad, lo que acarrea consigo problemas durante la fabricación de pulpa, continuas paralizaciones ,etc.

Tambien cabe mencionar la fábrica Papeles Peruanos S.A. , en Pucallpa, instalada en 1968 con capital privado. Si bien esta empresa trabajó con maderas tropicales como materia prima para obtener pulpa química para papel, sólo laboró hasta 1982 por las siguientes razones: tecnología obsoleta (la maquinaria utilizada era aprox. del año 1920) y alta variabilidad en la calidad del producto debido a la gran heterogeneidad de las especies madereras, lo que es una característica típica en los bosques tropicales.

6.10.2 PRODUCCIÓN Y DEMANDA NACIONAL

La demanda nacional de pulpa se puede estimar, según la relación de demanda, a partir del consumo aparente del papel en el Perú. En el **cuadro N° 1** se tiene información sobre el consumo aparente de papeles y cartones en el Perú, entre los años 1965 a 1990 y una proyección al año 2010; se observa que el consumo aparente tuvo un incremento del 71 por ciento, con un crecimiento anual del 2,255 por ciento .

La mejor explicación se encuentra al relacionarla con la tasa de crecimiento poblacional ; en el Perú la tasa de natalidad es de 2,6 por ciento anual. En el mismo cuadro se observa una estimación hecha por la FAO (ONU) para el año 2010 el consumo aparente llegaría a las 291 000 TM. Si bien en la actualidad se importa alrededor del 24 por ciento del papel consumido, al año 2010 llegaría al 30 por ciento, lo que podría representar más de 60 millones de dólares US en egreso de divisas, necesarias para satisfacer la demanda de papel.

La relación de fábricas de papel a nivel nacional son las siguientes:

FABRICA	ubicación	tipo de papel

		elaborado
TRUPAL	Trujillo	envolturas, embalajes
QUIMPAC-PARAMONGA	Paramonga	(todos los tipos)
PAP. ATLAS	Ñaña	escritura e impresión
GLORIA-TRUPAL	Agustino	embalajes,cartones
PAP. ZARATE	Zárate	sanitarios
PARACAS	Ventanilla	sanitarios
RIMINI	Chincha	sanitarios
PAP. DEL SUR	Chincha	embalajes,cartones
PANAMERICANA	Arequipa	sanitarios
CARTONES Vitarte	Vitarte	cartones
IPSA – LUGON	Ñaña	escritura,cartones
KIMBERLY	Puente Piedra	sanitarios
PROTISA	Santa Clara	sanitarios

6.10.3 TIPO DE PAPELES

A. PAPEL PERIODICO

Es el único tipo de papel que no se elabora en el país es el papel periódico, debido a las siguientes razones:

-menor costo y mejor calidad del papel importado;

-uno de sus componentes, la pulpa mecánica ,por su poca estabilidad ,requiere ser convertida rápidamente a papel (en una fábrica integrada de pulpa y papel);

-la tecnología de pulpa mecánica demanda una gran inversión y alto consumo de energía eléctrica.

B. ESCRITURA E IMPRESION

Este grupo de papeles requiere para su elaboración principalmente pulpas blanqueadas de fibra larga y fibra corta .La elaboración de este tipo de pulpa en el país requiere una gran inversión, entre la planta de pulpa, de blanqueo y de reactivos, además por el hecho de tener un alto potencial de contaminación, se requiere en la actualidad de una gran inversión para reducir al mínimo los niveles de contaminación ambiental por los gases y efluentes. Cabe agregar que la mayoría de inversiones actuales en fábricas de pulpa se orientan a la producción de pulpa química blanqueada de fibra corta, razón por lo que la oferta exportadora seguirá aumentando, con la consiguiente estabilización o disminución de su precio en el mercado.

C. SANITARIOS

Si bien es un producto que requiere calidad y limpieza en la pulpa utilizada, el mercado nacional , por razones de precio, practicamente obliga al uso de fibras secundarias (limpiadas y destintadas). El precio promedio de los papeles sanitarios elaborado con fibras secundarias varía entre 300 a 500 dólares US/TM , en cambio la elaborada con pulpa virgen puede llegar a ser el doble. Sin embargo, por razones de salud y limpieza debe haber una tendencia, a mediano y largo plazo (5 a 10 años) al uso de pulpa virgen para elaborar estos papeles; por tanto se requiere ,además de un mayor ingreso económico percápita, una buena planificación y mejor control por parte de los organismos competentes.

D. CARTONES

La calidad de la mayoría de los cartones de uso nacional esta dada por la rigidez, lo que es influenciado más por la masa (gramaje) del producto que por la misma calidad de la fibra; por esta razón, técnicamente, es casi indistinto usar pulpa virgen o fibra secundaria, prefiriéndose a esta última por su menor precio (menos de 200 dólares US/TM comparado con más de 400 dólares US/TM con pulpa virgen).

E. ENVOLTURAS Y EMBALAJES

Con el resurgimiento de la economía nacional, ha aumentado la demanda de envases y embalajes en el sector industrial y para productos de exportación; se incluye en este grupo a los papeles para cubiertas que conforma la parte superior de las cajas de cartón corrugado. Una mejor presentación y calidad del embalaje es solicitado por parte del sector consumidor; además de rigidez en el envase , se solicita otras características de resistencia y cualidades para la impresión de marca. Los fabricantes de este tipo de papeles prefiere en la actualidad a **la pulpa química sin blanquear de fibra larga** debido a que logra satisfacer todos los requisitos exigidos .

La posibilidad de elaborar este tipo de pulpa es favorable por las siguientes razones:

-existe una demanda local de más de 11000 TM, las que son importadas en su totalidad. Para el año 2010 la demanda puede ser de más de 25000 TM

-el capital de inversión es relativamente menor. Se requiere en promedio entre 500 a 700 dólares US por cada TM de la producción anual. Para pulpas blanqueadas el requerimiento es de más de 1500 dólares US/TM;

- el proceso para la pulpa química sin blanquear es menos contaminanate que en el caso de la blanqueada; el volumen de efluentes ,menos de 100 m3/TM, es menos de la mitad que en pulpas blanqueadas, además con una menor carga de reactivos residuales

De todas las pulpas que se importan ,**la pulpa química sin blanquear de fibra larga** es la que presenta mejores opciones para su elaboración en el país:

- menor capital de inversión
- mayor estabilidad del precio en el mercado
- aumento significativo del consumo aparaente en 20 años
- gran disponibilidad de la materia prima para su elaboración
- menor competividad con la oferta del mercado externo

PROBLEMAS

Problema 6.1: Una fábrica produce 191,5 t papel/dia, a 6% de humedad. La máquina de papel cuenta con una mesa de formación de 7,5 m de ancho (A_b) y trabaja a una velocidad (***v***) de 620 pies/min (caja abierta). Al final de la mesa, el papel sufre un recorte de 5 cm a cada lado. La consistencia en la caja de entrada es 0,5%; la constante k=0,88. Se pide calcular:
altura del fluido en la caja de entrada, h_o (mm)
gramaje seco del papel, Gs (p/m²)
caudal másico, Qm (kg/min)
espesor del slice en caja, e (mm)
Resolución: por teoría, se asume que menos de 200 m/min, se utiliza caja abierta, sin presión manométrica
Peso seco del papel = 191,5*(1-0,06) = 180 t/dia
v=620*0,3048 = 189 m/min = 3,15 m/s
. en caja abierta, ***v*** = k $[(2g*(h_o)]^{1/2}$
despejando valores
3,15/0,88 = 12,81 m²/s² = 2*9,8 m/s² * h_o (m)
h_o = 0,6536 = 654 mm

Por otro lado, de la producción P, se tiene:
180 t/dia= 180000 kg/dia = v*t*Gs*A
= 189 m/min * 1440 min/dia * Gs * A
ancho neto A = 7,5m –(2*0,05)m =7,4 m
Despejango Gs gramaje seco (kg/m²)
Gs=0,0894kg/m² (89,4 g/m²)

Del caudal volúmicoQv= v*Ab*e; despejando espesor slice e = Q_v / (7,5m*189 m/min) = (m)
Caudal másico (Qm) a partir del gramaje
Gs= Qm / (A_b****v***) ; A ancho de mesa=7,5 m
Qm= (Gs* A_b**v*) = 126,7 kg/min

Asimismo, de la fórmula Qm = Qv* c% *10
Despejando Q_v= [Q_m / (c%*10)] =126,7/(0,5*10)
Q_v = 25,34 m³/min y el valor del slice
e = 25,34/(7,5m*189 m/min)
e= 0,0178 m = 17,8 mm

Problema 6.2: Una fábrica de papel cuenta con una mesa de formación de 6,1 my trabaja a una consistencia en la caja de entrada de 0,4%. En la caja se aplica una presión de aire de 50 kPa y la altura de la pasta es 10 cm. El caudal volúmico (Q_v) en la mesa es 40 m³/min. Al final de la mesa, el papel sufre un recorte de 5 cm a cada lado. Se pide calcular:
Velocidad de la máquina (m/min)
Espesor del slice en la caja (mm)
Gramaje seco del papel (g/m²)
Producción diaria de la fábrica (t/dia a 6% de humedad)
Resolución
Presión aire 50 kPa*(0,0102)= 0,51kg/cm² equivalente a 5,1 m de altura hidráulica (h_1) en caja. Luego, velocidad ***v*** = k*$[2*g*(h_o+h_1)]^{1/2}$
v=0,9* $[(2*9,8)*(5,1+0,1)]^{1/2}$ = 9,086 m/s
***v* = 545 m/min**

Qv= A_b*e****v***= 40 = 6,1 m*(e)*545; luego
e =0,012 m = 12 mm

Caudal másico Q_m=Q_v*c%*10= 40*0,4*10=
Q_m =160 kg/min

Para hallar gramaje seco G_s
G_s=Q_m/(A_b****v***) =160/(6,1*545) = 0,048 kg/m²
Gs= 48 g/m²

Producción de papel, gramaje acondicionado (P')
P=545m/min*1440min/dia*6m*(48*10^{-6}t/m²)=
P=226 t/dia. . Aumentando 6% de humedad:
P'= 226/(1-0,06) = 240 t/dia

Problema 03: Una fábrica de papel elabora un papel de 74 g/m² con 5,4% de humedad. La mesa de formación tiene un ancho total de 5,12 m, pero al final de la mesa el papel sufre un recorte de 6 cm a cada lado. El caudal másico (Q_m) es 110 kg/min y el espesor del slice a la salida de la caja es 15 mm. La altura del fluido en la caja es 8 cm (h_o); k=0,9. Se pide calcular:
velocidad de máquina (m/min);
presión de aire en caja (kPa)
consistencia en la caja de entrada %
producción diaria de fábrica (t/dia) con la misma humedad
Resolución:
Gramaje G_s=74*(1-0,054)=70g/m² (0,07kg/m²)
Pero Gs=Qm/(***v****A_b); A_b=5,12 m. Despejando ***v***

v=110/(0,07*5,12) =306,9 m/min

De la fórmula ***v*** =5,11m/s = k*[2*g*(H)]$^{1/2}$

Luego (5,11/0,9)²=32,24 m²/s² =2*9,8 m/s² * H

Despejando H=h_o+h_1=1,65; restando h_0=8cm:

h_1=1,65-0,08=1,57 m y su equivalente en presión

p_2= 0,157 kg/cm² /0,0102 = 15,4 kPa

Caudal Qv=5,12*0,015*306,9=23,57 m³/min

En la fórmula de Qm=Qv*10*c%

Despejando c%

c%=(110/23,57)*0,1= 0,47%

La producción de papel con gramaje acondicionado P'=306,9m/min*1440min/dia*5m*(74*10^{-6})t/m²

P'= 163,5 t/dia

VI. DESCOMPOSICION TERMICA DE LA MADERA

La estructura química de la madera, compleja en su composición y formación, viene a ser el resultado de una serie de reacciones bioquímicas en el árbol, entre los nutrientes del suelo, el CO_2 y oxígeno del aire, así como de la energía solar, que conlleva a la formación de cada uno de los componentes orgánicos, con composición elemental variable de carbono, hidrógeno y oxígeno. En cada componente, los elementos se agrupan con enlaces del tipo C-C , C=C, C-O , entre otros, que mantienen una energía química de unión.

Definición.- La descomposición térmica es un proceso de transformación, con cambios, irreversibles, que ocurren en la composición química de la madera por acción del calor. La energía térmica altera los enlaces entre las unidades que conforman los polímeros (holocelulosa y lignina), desdoblándolos en unidades simples o polímeros de menor peso molecular.

A la descomposición térmica se la denomina pirólisis, aunque algunos autores suelen mencionar este término sólo para descomposición en medio anaeróbico.

6.1 Formas de Descomposición Térmica

La descomposición de la madera por efecto del calor se clasifica según las condiciones del medio de reacción, que considera la presencia del aire, a presión atmosférica:

(i) En condiciones aeróbicas, involucra la presencia del aire durante toda la reacción; el oxígeno interviene junto con los componentes de la madera, en reacción, parcial o total, catalizada por la temperatura (mayor a 200 °C) y favorecida por las características de la materia prima (tamaño y humedad). Dentro de este caso se considera a:

- combustión parcial, con poca cantidad de oxígeno y temperaturas menores a 1000 °C

- combustión total, hay exceso de oxígeno en la reacción y temperaturas mayores a 1000 °C

(ii) En condiciones anaeróbicas, a diferencia del anterior, se impide la presencia del aire en la reacción; de igual manera, la madera se descompone a partir de los 200 °C. Ahora se considera a:
- carbonización, se lleva a cabo entre 400 °C a 55 °C; se obtiene el carbón vegetal como único producto.
- destilación seca, igual que el caso anterior, pero además hay recuperación de los destilados (formados durante la reacción) por condensación.

(iii) En ambas condiciones, sucesivas, aeróbicas y anaeróbicas, siendo el único caso el de:
- gasificación, se busca descomponer la madera por oxidación hasta combustión, y luego sobre el valor de los 1000 °C, por reducción, hasta la obtención de gas combustible CO o gas de síntesis (CO y H_2), como materia para la industria química.

Tanto en la combustión como en la gasificación, lo que se busca es principalmete la obtención de energía a partir de la madera. En el caso de combustión, es el método de mayor aprovechamiento, mayor rendimiento y eficiencia, con menor costo de proceso; el poder calórico de la madera, cambia con la humedad, varia de 2000 a 4000 kcal/kg. En la gasificación, los gases obtenidos son de alto poder calórico, aunque el rendimiento es bajo y mayor el costo unitario. En la carbonización y destilación seca de la madera, el objetivo principal es la obtención del carbón vegetal, utilizado con diferentes fines, energéticos, insumo químico, metalurgia, etc. El uso energético se justifica en pequeña escala, debido al alto costo relativo del carbón vegetal frente a otras fuentes tradicionales de energía (petróleo, carbón mineral, gas, etc.); además, la ausencia o mínima presencia de azufre en su composición la hace apropiada para uso en combustión de fuego directo (cocina artesanal, pollerías). Ver figura 6.1.

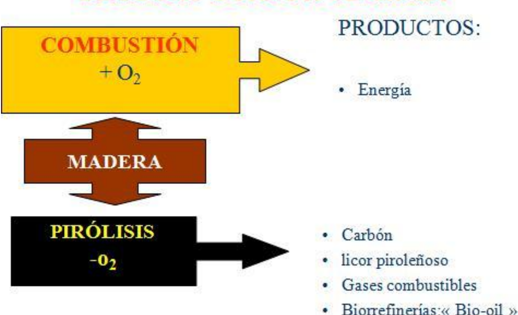


FIGURA 6.1: Productos obtenidos de la madera por pirolisis y combustión

6.2 ENERGIA Y TERMOQUIMICA

6.2.1 Energía

Según la definición de Hunt (1979) es todo aquello capaz de realizar trabajo; la clasifica en e. potencial, térmica, cinética, química, eléctrica, nuclear y radiante. El mismo autor define a:

- la energía térmica, como la energía cinética de las moléculas
- la energía química, procede de la capacidad de los átomos para desarrollar calor al combinarse o separarse.

6.2.2 Combustión

Corresponde a una reacción, catalizada por la temperatura, entre un material combustible con el oxígeno del aire. Como producto de las reacciones se libera energía química que se transforma en calor. Cuando el objetivo de la combustión es calentar masa o materia, entonces el calor liberado fluye, como energía térmica, de la zona de reacción hacia la masa que se calienta. Un ejemplo común en este caso es cuando se quema gas propano, en una cocina, que reacciona con el oxígeno del aire; el calor liberado es tomado por el agua contenida dentro de un hervidor; en el agua, el calor se mantiene como energía térmica en sus moléculas, cuyo valor se acumula, dependiendo del tiempo de reacción, presión, de los coeficientes de conductividad y capacidad calórica, pudiendóse producir un cambio de fase en la materia.

6.2.3 Termoquímica

Para poder entender mejor lo que sucede en los procesos térmicos, es necesario tener en cuenta algunos conceptos sobre Termoquímica, la que se define como la parte de la Termodinámica que estudia los cambios de calor en las reacciones químicas.

6.2.4 Entalpía

La entalpía (H) es el contenido calórico de un sistema y se expresa mediante la ecuación:

$$H = E + pV$$

E: energía interna del sistema, que depende de la naturaleza química de las sustancias involucradas. Los cambios de energía interna (dE) se relacionan con la primera ley de la Termodinámica o de la conservación de la energía.
dE = calor del sistema - trabajo efectuado
p : presión del sistema
V : volumen del sistema

El cambio de entalpía (dH) corresponde al calor de reacción a presión constante, siendo su valor negativo cuando el sistema o proceso genera calor (reacción exotérmica); el caso contrario, el valor de dH es positivo cuando el calor es absorbido (reacción endotérmica).

6.2.5 Capacidad calórica

Si se relaciona el incremento de calor que se genera en función de la temperatura

$$C = \frac{dq}{dT} \approx \frac{\text{incremento de calor}}{\text{incremento de temperatura}}$$

se deduce el concepto de capacidad calórica como la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de una sustancia en 1 °C; la capacidad calórica molar es el calor requerido por una mol de sustancia para 1 °C, a un valor de temperatura determinada. Dado que los valores varian con T, entonces se suelo adoptar un valor promedio de la capacidad calórica (C medio) :

$$C\ \text{medio} = \frac{\int_{Ti}^{Tf} C\,dT}{Tf - Ti}$$

Ti: temperatura inicial; Tf: temperatura final

A su vez se tienen variantes de los conceptos:
C_p: capacidad calórica a presión constante
C_v: capacidad calórica a volumen constante

Por regla general $C_p - C_v \approx 2$ calorías

6.2.6 Calor específico (Ce)

Calor requerido para elevar la temperatura de 1 g de una sustancia en 1 °C. Sus unidades de expresión, en el sistema CGS, son calorías/gramo * °C. En el sistema inglés las unidades son BTU/libra * °F. Este concepto suele confundirse con el propio concepto de caloría la que se define como una unidad energética

1 caloria = 4,1868 joules = 4,1868 N-m
1 BTU = 252 calorías

6.2.7 Calor de Combustión

Tambien llamada entalpía de combustión, es el calor de reacción liberado por una sustancia quemada; este valor se mide en un calorímetro. El valor dH, llevado a un valor de 25 °C, se expresa en varias unidades:

dH^{25} = (kcal/kg) ó (cal/mol) ó (cal/g)

Valores de calores de combustión de diversas sustancias se muestran a continuación:

sustancia	dH^{25} (kcal/kg)
• monóxido carbono (CO)	2415
• etanol (C_2H_5OH)	7102
• carbono (C)	7831
• benceno (C_6H_6)	9999
• octano (C_8H_{18})	11447
• propano (C_3H_8)	12034
• metano (CH_4)	13265
• hidrógeno (H_2)	33888

6.2.8 Combustible

Es toda aquella sustancia capaz de liberar energía en una reacción con oxígeno, a un temperatura determinada; el calor que libera un combustible es su calor de combustión. Los combustibles se clasifican en:

(i) **sólidos:** leña (madera y arbustos), bagazo, carbón mineral, carbón vegetal, turba
(ii) **líquidos:** gasolina (octano), alcohol etílico, aceites, petróleo
(iii) **gaseosos:** hidrógeno, propano, etileno

Tambien existe una clasificación de los combustibles por su origen:

-naturales, aquel que se utiliza en forma bruta, sin ser procesado antes de generar calor. Ejm. leña, bagazo, turba. Dentro de esta clasificación se distinguen:

* de origen mineral: carbón, gas
* de origen orgánico: provenientes de vegetales o animales. A este grupo también se le denomina **biocombustibles**.

-procesados, aquel que ha pasado por una etapa de elaboración o separación para poder actuar como combustible. Ejm, gasolina, propano.

6.2.8.1 Biocombustibles

El término de biocombustibles se aplica para todos aquellos que provienen de seres vivos (animal o vegetal). Dentro de este grupo se identifica a la madera como el más importante, que incluye rama, corteza, hojarasca, provenientes del bosque. Asimismo, la FAO (2001) propone una clasificación de los biocombustibles, que considera además, a los combustibles provenientes de los residuos agrícolas (agrocombustibles) y a los residuos urbanos. Ver figura 6.2

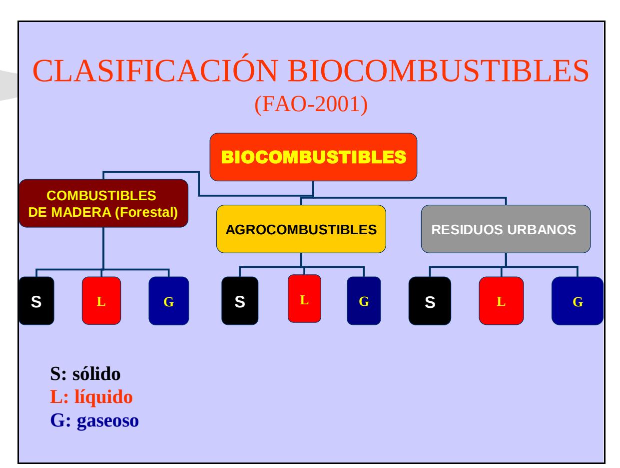


FIGURA 6.2: Clasificación de biocombustibles (FAO, 2001)

La clasificación de la FAO incluye subdivisiones en cada caso, de biocombustibles, según su estado en uso final: sólidos, líquidos o gaseosos.

- B. sólidos: madera, ramas, tallos de cereales, ramas de podas, bosta
- B. líquidos: alquitrán de licor piroleñoso

de madera, de ramas o de residuos agrícolas, etanol de caña de azúcar.

- B. gaseosos: gas metano (proveniente de excremento animal), gas CO (de la gasificación de madera)

La composición de un combustible hidrocarburo, carbono e hidrógeno, definen la cantidad de oxígeno necesario, según la ecuación estequiométrica de combustión (PERRY-1992). En base al modelo de Perry, se establece la ecuación para combustibles hidrocarburos, no oxigenados y oxigenados; esta útlima cooresponde a los combustibles de madera.

COMBUSTIÓN DE HIDROCARBUROS

$$C_mH_n + \left[\frac{4m+n}{4}\right]O_2 \Longrightarrow mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O \quad + \text{ calor}$$

COMBUSTIÓN DE HIDROCARBUROS OXIGENADOS

$$C_mH_nO_p + \left[\frac{4m+n-2p}{4}\right]O_2 \Longrightarrow m\ CO_2 + \frac{n}{2}H_2O$$

Según lo expuesto anteriormente, la ecuación de combustión de hidrocarburos oxigenados se aplica para combustibles oxigenados, como es la madera y muchos otros combustibles de biomasa vegetal. Al respecto, según la ecuación de Klason, Novlin y Heidenstamm, se propone la ecuación de combustión para la madera.

$$C_{42}H_{60}O_{28} + 43\ O_2 \longrightarrow 42CO_2 + 30\ H_2O$$

Otra propuesta, para ecuación de combustión, diferenciando a las maderas por su composición, sea coníferas, o latifoliadas, es mostrada a continuación:

Ec. COMBUSTIÓN: CONÍFERAS

$$C_{44}H_{64}O_{28} + 46\,O_2 \Longrightarrow 44\ CO_2 + 32\ H_2O$$

- C 50,77 %
- H 6,15 %
- O 43,08 %

+ calor (4700-5300 kcal/kg)

Ec. COMBUSTIÓN: LATIFOLIADAS

$$C_{40}H_{60}O_{28} + 41\,O_2 \Longrightarrow 40\ CO_2 + 30\ H_2O$$

- C 48,58 %
- H 6,07 %
- O 45,35 %

+ calor (3500-4500 kcal/kg)

Se observa que, por la mayor cantidad de carbono en madera de coníferas, se obtiene una mayor cantidad de calor que se libera en la reacción de combustión. Las maderas de coníferas contienen un mayor porcentaje de lignina en su composición, lo que favorece la mayor cantidad de carbono en la madera.

El calor que se libera es el poder calórico de la madera.

6.2.9 Poder calórico

es la cantidad de calor liberada por un combustible, en una combustión completa. En el caso de los combustibles sólidos y líquidos, tiene la misma forma de expresión del calor de combustión (kcal/kg) y en c. gaseosos se expresa en kcal/m^3. Para los combustibles, hay dos formas de expresión del poder calòrico:

Poder calórico superior: (PCS) corresponde al calor liberado en la combustión, por unidad de masa del combustible, a volumen constante; este valor incluye el calor latente del agua en los productos de combustión, enfriados debajo de 15,6 °C (60 °F)

Poder calorífico inferior: (PCI) parte del mismo valor de PCS, a presión constante, pero no incluye el calor latente del agua liberada.

PCI = PCS - 572,22 * w (kcal/kg)

w: kg agua formada/kg combustible

pero como en la mayoría de las reacciones de combustión, sólo se evalua la humedad del combustible, entonces, se ha propuesto la siguiente fórmula de PCI_h para un determinado valor de humedad (h) (FAO, 2001):

PCI_h = PCS (1-h) - 6 (%h); h : humedad

$$\%h = \frac{\text{masa húmeda - masa seca}}{\text{masa húmeda}} * 100$$

$h = 0{,}01 * \%h$

El poder calórico superior se obtiene por determinación en una bomba calorimétrica o sino tambien aplicando la ecuación teórica obtenida a partir de la propuesta por el *Institute of Gas Technology*:

$$PCS\ (\text{kcal/kg}) = 81{,}4\ C + 315{,}9\ H + 16{,}3\ S - (Y)$$

$$Y = 3{,}6\ A + 28{,}63\ (O + N)$$

Los valores porcentuales de los componentes del combustible son:

C: % carbono H: % hidrógeno
S: % azufre A: % cenizas
O: % oxígeno N: % nitrógeno

De un análisis químico para madera, se puede determinar los valores de PCS a partir del respectivo análisis de los componentes mayores (holocelulosa, lignina) y cenizas. Los valores de S y N en madera son despreciables (≈ 0). Algunos valores de PCS se mencionan a continuación para diferentes combustibles:

COMBUSTIBLES:	**PCS (kcal/kg)**
• leña, maderas de latifoliadas	3500 - 4500
• maderas de coníferas	4700 - 5300
• Turba	3000 - 4000
• carbón bituminoso	7500 - 8400
• carbón vegetal	6600 - 7500
• coque inferior	6500 - 7600
• corteza	1500 - 2000
• bagazo seco	4000 - 4500
• basura orgánica	4700
• papel	4200
• trapos	4250

6.3 ENERGIA Y COMBUSTION DE LA MADERA

6.3.1 Definición de leña

Es la madera que se destina para ser quemada en cocinas, calefacción, producción de energía, etc. Incluye la madera para la producción de carbón en fosas y hornos portátiles; tambien incluye leña de troncos y ramas, con corteza y en el caso de comercialización, tambien se considera al aserrín (FAO-1967).

6.3.2 Producción de Leña en el Mundo

Según las estadísticas forestales, se determina que, a nivel mundial, la mayor parte de la madera que se consume se destina a la generación de energía; en el mundo se consumen más de $3275*10^6$ m^3/año de madera rolliza, de las cuales algo más del 58 % se destina como leña o la producción de carbón vegetal, y la diferencia, 42 %, como madera de uso industrial (Steiter, 2011)[12]. Del total de madera para leña y carbón, el 32,5 % se consumen en África, 41,6 % en Asia, 7,6 % en Amércia Latina y el Caribelos denominados países en desarrollo (Africa, Latinoamérica, Medio Oriente, etc.). la diferencia, 18,3 % se consume en los países de Norteamérica, Europa y Oceanía. A nivel de países productores destacan India, China, Brasil, Etiopía y el Congo. En el comercio, destacan como exportadores Latvia, Ucrania, Rusia, Francia y Bosnia-Herzegovina; como importadores Italia, Finlandia, Austria, Suecia y Grecia. En el Perú, de los más de 8 millones m^3/año de madera que se produce, más del 87 % es producida y consumida por la población rural como leña o para la producción de carbón vegetal. La necesidad de energía como leña es tan evidente que en países que no cuentan con recursos energéticos tradicionales (petróleo, gas) o sistemas modernos para su generación (hidroeléctricas, plantas nucleares), sólo tienen como alternativa a la leña. Una forma de evaluación de la demanda son los índices propuestos por el mismo autor, *índice de producción de madera para leña y carbón por habitante* (IPL) en diferentes países del mundo; ver figura 6.3.

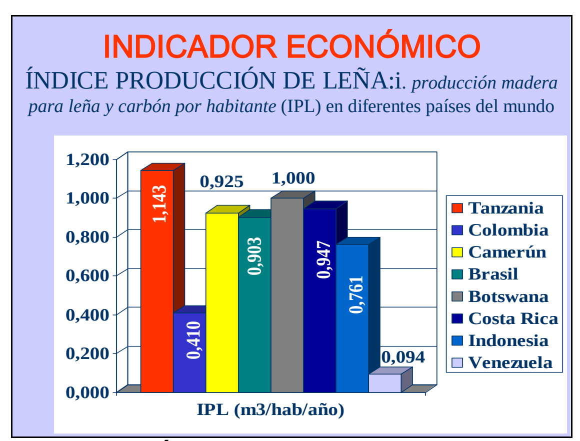


FIGURA 6.3: Índice de Producción de Leña en algunos países.

Se observa que el IPL esta en relación directa con la propia disponibilidad de combustible (p.e. petróleo o hidroeléctrica) y/o con el grado de pobreza del país. Varios países del centro de Africa, sin recursos energéticos y con ingresos precápitas bajos (menos de 250 $/hab * año) tienen valores altos de IPL; el caso de Brasil o Costa Rica se explica por su escasez de energía propia pero con abundancia en recursos forestales, aunque es un caso contrario Venezuela, que es un gran productor de petróleo.

Se concluye que la madera es un combustible barato y accesible a la población; en países poco desarrollados (Asia, Africa, América Latina) donde es difícil el acceso a las fuentes de energía tradicionales, la leña u otro de biomasa vegetal, constituye el único recurso, disponible como combustible doméstico, al alcance de la población. En los países en desarrollo, definitivamente la leña representa la única forma de generación de energía. El promedio de IPL por región es de 0,85 en el África, 0,34 en Asia, 0,78 en América Latina y el promedio mundial es 0,37; el promedio en países desarrollados es 0,13.

La situación descrita en el párrafo anterior se manifiesta en el Perú en la población rural de las 3 regiones del país; en Costa, si bien hay mayor desarrollo que las otras regiones, todavía es común ver en los departamentos de Piura y Lambayeque, que la población rural se abastezca unicamente de leña, que obtiene del bosque seco. En Sierra, los pobladores del campo recurren al uso de pasto ("ichu"), arbustos u otras plantas de la región andina, así como tambien residuos en aserraderos de eucalipto, bosta, arbustos, etc. En Selva , la situación no dista de ser diferente entre la población del campo y la ciudad, de bajos recursos, que utilizan principalmente residuos de las industrias forestales, como fuente energética. Dada la importancia del consumo de leña en el Perú, se hace indispensable elaborar una estrategia de política energética que incluya la definición de las características técnicas del recurso (dimensiones, humedad, edad, etc.), la regulación del consumo de leña y su distribución acorde con un plan de manejo del recurso. Un sistema de evaluación de energía es propuesto por la FAO (*Wisdom*) como estrategía para la planificación de proyectos energéticos con biomasa forestal.

6.3.3 Especies Forestales para Combustible

Se entiende la importancia que tiene en muchos países en desarrollo, el uso de la leña como único combustible. Bajo ciertas condiciones económicas, la generación de recurso forestal no siempre se hace con el fin de obtener madera para fines industriales, como es el caso de la mayor parte de las plantaciones bajo planes de manejo, en el Mundo. La producción de leña tiene una importancia económica y social, principalmente en los países en desarrollo, donde los gobiernos deben planificar el desarrollo e inversión de recursos para crear bosques y además capacitar a la población para la mantención del mismo. Con la producción de leña no se obtendrá un ingreso monetario adecuado, pero si se obtienen múltiples beneficios, que debidamente valorados, vendría a ser la compensación económica de los bajos ingresos del poblador rural.

Muchos investigadores mencionan la importancia que se le debe dar al uso de la madera para leña, pero se debe tener en cuenta la intensidad de uso, ya que la misma puede provocar un agotamiento del recurso, en especial en bosques secos debido a la baja tasa de crecimiento volumétrico (CMA en m^3/ha * año). Dentro de las características a tener en cuenta para el aprovechamiento de especies forestales para leña, se mencionan las siguientes:

- se debe utilizar de preferencia ramas o madera de raleo, árboles de fuste irregular, aunque la corta final se debe

justificar cuando la especie tiene un valor alto de CMA o facilidad en su regeneración;

- hay preferencia por maderas duras, densidad mayor a 0,5 g/cm^3, debido al mayor rendimiento calórico por unidad de volumen; sin embargo las maderas de menor densidad se pueden utilizar debibo a que tienen una mayor tasa de crecimiento;

- se utilizan especies con un bajo valor de su madera en el mercado. Muchas veces es difícil encontrar otro uso a la madera que normalmente se destina como leña; sin embargo la tecnología actual y la escasez de recursos forestales en algunas regiones obliga a una mayor eficiencia en el aprovechamiento, sobretodo cuando se abastece a plantas que procesan tableros de partículas y pulpa.
-

Dentro de las especies que más se utilizan en el Perú para leña se mencionan:

Costa norte, algarrobo (*Prosopis pallida*), sapote (*Capparis scabrida*);
Costa y Sierra Central (menos de 1000 msnm) molle (*Schinus molle*);
Sierra: más de 2000 msnm, eucalipto (*Eucalyptus globulus*). (más de 3000 msnm) quinual (*Polylepis* sp.), colle (*Buddleja* sp.), tola (*Baccharis tricuneata*)
Selva, residuos de varias especies de industrias forestales (parquet, durmientes, aserraderos, etc.).

En cada región, siempre hay preferencia por las especies nativas, a pesar de que en la mayoría de los casos son especies de crecimiento lento. Tambien se utilizan especies introducidas, siendo lo más destacado la madera de eucalipto en toda la Sierra, y también el pino (*Pinus radiata*, P. *patula*, etc.) en el departamento de Cajamarca. Asimismo, FAO (FLINTA-1960) recomienda las siguientes especies para leña: *Eucalyptus camaldulensis, E. tereticornis, Acacia mollisima, Casuarina equisetifolia.*

6.3.4 Balance Energético en la Combustión

El objetivo de mayor importancia en la descomposición térmica es la producción de calor partir de la madera. Los enlaces internos de la materia orgánica liberarn la energía química durante la combustión, inherente a los enlaces de carbono con los demás elementos. Pero la cantidad de calor que se desprende depende del método o del producto que se obtiene en cada forma de descomposición. Las rutas de producción de calor por cada método de descomposición térmica se indican a continuación:

MATERIA PRIMA: MADERA

combustión ⇒ calor
carbonización ⇒ carbón ⇒ calor
gasificación ⇒ oxidación ⇒ reducción ⇒ gas ⇒ calor

Se observa la ventaja que tiene la combustión, por tener menos etapas para producir calor; en cambio la menos eficiente, por el # de etapas, es la gasificación. En forma numérica se puede demostrar esta teoría, mediante la aplicación de un análisis simple de balance de energía o térmico en cada caso.

Balance de Masa.- Es una evaluación de la materia que ingresa, se acumula o sale de un sistema o proceso. El balance de masa se clasifica según si el sistema se efectúa en forma intermitente o en regimen contínuo; si durante el balance del sistema ocurren reacciones químicas, entonces el balance corresponde al de un proceso.

Balance de Energía.- Corresponde a una evaluación del flujo de energía de ingresa o sale de un sistema o proceso. En el caso de balance de energía, existen dos formas de considerar el balance: en sistema abierto o en sistema cerrado. El primer caso implica una transferencia de energía a medida que esta se genera durante el desarrollo del proceso, siendo $Q < 0$ ó entalpía negativa. En el caso del sistema cerrado, $Q = 0$.

En la combustión de madera, la evaluación del sistema se hace con balances de masa con reacción química (intermitente o contínuo) y los balances de energía en sistema abierto.

Problema

se evalua un sistema de combustión de un m^3 de madera con una densidad básica de 0,6 g/cm^3, contiene 30 % de humedad (h=0,3). El PCS m es 4000 kcal/kg.

El análisis busca evaluar la eficiencia térmica de la combustión, mediante la cantidad de calor que se libera. Suponiendo que la combustión es completa, en un regimen intermitente y abierto.

- Materia seca Ms = Volumen * Densidad básica

$Ms = 1\ m^3 * 0,6\ t/m^3 = 0,6\ t = 600\ kg$

- Si la combustión es completa, entonces se supone que toda la madera se convierte en CO_2 y agua

$$C_{42}H_{60}0_{28} + 43\ O_2 \Rightarrow X\ CO_2 + Y\ H_2O$$

En caso de efectuar balance de materia, además se debería evaluar los gases que se eliminan durante la combustión.

- Se estima el poder calórico inferior (PCI_m) a partir del p. calórico superior (PCS)

$$PCI_m = [PCS_m * (1 - h)] - 6 * \%h$$

$$= [4000 * (1 - 0,3)] - (6 * 30) = 2800 - 180 = 2620 \text{ kcal/kg}$$

- Luego el total de calor por combustión completa (Qm) a partir de una tonelada de madera es

Qm = 600 kg * 2620 kcal/kg = 1 572 000 kcal.

Con la misma información de la madera, ahora estime la cantidad de calor que se genera por combustión completa del carbón que se obtiene mediante un sistema de carbonización cuyo rendimiento carbón/madera es de 20 % . El PCS del carbón es 7500 kcal/kg y su humedad 2 % (h = 0,02).

- Se estima la cantidad de carbón obtenido a partir de la madera seca, conforme al concepto de rendimiento:

$$20\ \%\ \text{rendimiento} = \frac{20 \text{ kg carbón seco}}{100 \text{ kg madera seca}}$$

600 kg Ms * 0,2 = 120 kg carbón = Cs

- ahora se determina el poder calórico inferior del carbón (PCIc)

$$PCIc = [PCSc * (1 - h)] - 6 * \%h$$

$$= [7500 * (1 - 0,02)] - 6*2 = 7350-12 = 7338 \text{ kcal/kg}$$

- Luego se calcula el total de calor liberado de todo el carbón obtenido a partir de 1 m^3 de madera

Qc = 120 kg * 7338 kcal/kg = 880 560 kcal

Tal como se habia previsto, hay una gran pérdida de energía por obtener la misma a partir de carbón

Qm - Qc = 1 572 000 - 880 560 = 691 440 kcal

que equivale a una disminución energética de 44 % , si es que se desea obtener el calor a partir del carbón.

El uso del carbón vegetal presenta ventajas frente al uso de madera en combustión:

-menor peso por unidad de volumen
-combustión sin humos
-mayor eficiencia en la transferencia
-sirve para uso en cocina, como fuego directo

Sin embargo no hay una demanda grande del carbón vegetal en combustión por las siguientes razones:

- mayor costo productivo, en madera menos de 0,02 $/kg y en carbón entre 0,1 a 0,2 $/kg;
- menor rendimiento global en la combustión (Qm > Qc)
- el carbón es ácido, lo que le genera un carácter corrosivo en el medio de uso
- es muy frágil, quebrándose con facilidad en la manipulación.

En la gasificación de la madera, el caso es extramadamente ineficiente en la generación de calor debido a las etapas sucesivas que hay entre madera y el gas combustible. En los gasificadores se obtiene CO como principal componente del gas combustible, además del hidrógeno. El CO se le utiliza como un gas limpio para motores de combustión interna, pero tiene un bajo poder calórico (2400 kcal/kg). En el caso de la obtención de hidrógeno, la ventaja es la de ser un gas de alto poder calórico (33000 kcal/kg), sin embargo como producto de su combustión se obtiene sólo agua, que en el sistema de los motores de combustión interna podría resultar perjudicial. La obtención simultánea del CO con el hidrógeno 8gas de síntesis), es importante ya que se utiliza como materia prima para nuevos productos químicos.

Las experiencias han demostrado que la gasificación es un sistema de producción de energía factible sólo en lugares donde hay extrema escasez, local, de combustibles, y donde la presencia de una abundante la biomasa forestal es una buena alternativa de uso. Además, otro factor influyente favorable para gasógenos es el hecho de no haber acceso a vias de comunicación para el transporte de combustibles tradicionales. Lógicamente, aqui se esta haciendo referencia a lugares muy aislados dentro de un país, lo que no debería ocurrir, de existir la adecuada infraestructura vial de transporte, necesaria para el desarrollo

integral de un país. En el Perú, el dominio, en el mercado de combustibles, del petróleo, y ahora gas natural, por sus ventajas técnicas y económicas, la facilidad geográfica para la instalación de hidroeléctricas de pequeña y mediana capacidad y la adecuada infraestructura vial nacional son contrarias al uso de sistemas de gasificación de biomasa forestal. Además, en la coyuntura actual y futura, influye el hecho de contar con una gran reserva de gas natural, en la región sur oriental (zona de Camisea, entre Ucayali y Cuzco). Por estas razones, la gasificación de la madera es una alternativa potencial de generación de energía, pero con posibilidades limitadas de instalación en el Perú, según lo antes mencionado.

VII CARBONIZACIÓN DE LA MADERA

7.1 Antecedentes

Esta forma de transformación de la madera tiene antecedentes relacionados con la obtención de un producto energético: el carbón vegetal fue ya conocido por los egipcios, griegos y romanos. Mas aún, al hacer referencia al carbón mineral (carbón de piedra) se sabe que este producto tiene un origen vegetal, proveniente de los licopodios o helechos arborescentes que crecieron en la Tierra ya hace mas de 300 millones de años durante el período carbonífero, era paleozóica. Durante este período, el clima muy húmedo que predominaba sobre el hemisferio norte y el Ecuador, favoreció la formación de inmensas áreas vegetales; invadidos por las aguas marinas, estas coberturas boscosas se degradaron, se compactaron en el suelo como espesas capas minerales ricas en carbono que son hoy en dia las vetas del carbón mineral; es a causa de estos fenómenos que el período debe el nombre carbonífero (Carusso, 1995)[13]. Se estima que el período carbonífero ocurrió entre los 363 a 290 millones de años A.C. En el cuadro 7.1 se muestra los años transcurridos en la aparición de los vegetales sobre la Tierra.

CUADRO 7.1: Eras y Períodos de la Tierra: Formación de seres vivos (Carusso *et al* 1995)

ERA	PERÍODO	Génesis	(-) $x10^6$ años
Paleozoico	Precambrieno	protozoarios, algas	4600
	Cambrieno	(invertebrados)	570
	Ordovicieno	vegetales marinos	510
	Silurieno	plantas terrestres	439
	Devonieno	algas complejas	409
	Carbonífero	Bosques de licopódios	363
	Permieno	primeras coníferas	290
Mesozoico	Trias	*Cycas, Ginkgos*	245
	Jurásico	*Equisetum, Taxus* y *Sequoia*	208
	Cretáceo	*Pinus,* angiospermas, flores, *Magnolia*	146
Cenozoico	Terciario	*Quercus, Betula*	65
	Cuaternario	*Liquidambar, Homo sapiens*	1,64

Algunas especies vegetales del período carbonífero se mencionan a continuación:

Especie	Familia	altura (m)
Pecopteris	Maraltiaceae	4
Paripteris	Medullosaceae	5
Mariopteris	?	5
Medullosa	Medullosaceae	5
Lepidendron	Lepidendroceae	10
Cordaites	Cordaitaceae	10
Glossopteris	Glossopteridaceae	8
Alethopteris	Medullosaceae	5

Como consecuencia de los movimientos de tierra y los cambios climáticos desde entonces, toda esta materia orgánica quedo cubierta y sometida a la presión de enormes capas de lodo, agua y arena, que en ausencia de oxígeno, dió lugar a un proceso de transformación hacia los actuales yacimientos carboníferos que existen en diversas partes del planeta. Este carbón, tambien llamado hulla, asi formado se le encuentra a profundidades mayores a los 200 m.

La explotación industrial de la hulla se inició a principios del siglo XIX en Europa; sin embargo, ya en el año 1709, A. Darby obtuvó el coque como producto del calentamiento anaeróbico de la hulla, con el fin de eliminar las sustancias volátiles.

A continuación se mencionan otras denominaciones referentes al carbón:

antracita: es un carbón fosil de mucha antiguedad en su formación y que presenta hasta 95% de carbono fijo, densidad de 1,2 a 1,8 g/cm3 y poder calórico entre 23 y 35 MJ/kg [14]

lignito: es un carbón de formación geológica reciente y presenta un bajo porcentaje de carbono fijo (60 % a 70 %); poder calórico de 10 a 20 MJ/kg[15].

turba: es un carbón no acabado, de aproximadamente unos 20000 años, con un promedio de 56 % en carbono fijo.

Con la evolución de las especies vegetales se forman los bosques actuales de coníferas (período cretáceo, hace 135 millones de años) y de latifoliadas (período terciario, hace 63 millones de años). El lector podrá relacionar que, aparentemente, en la formación de lignito y turba,

las especies vegetales son diferentes de aquellas que dieron lugar a la antracita y la hulla.

Las especies forestales, coníferas y latifoliadas, son las actuales materias primas empleadas para la producción del carbón vegetal; este carbón obtenido a partir del tallo de las especies mencionadas es tambien denominado carbón de palo. La actividad de carbonización o conversión de la madera en carbón, surge probablemente de la necesidad de disponer de un recurso energético accesible, de fácil manipulación y combustión. Además el carbón vegetal, comparado con la hulla, presenta una menor cantidad de sustancias volátiles y de azufre.

7.2 Definición del Carbón Vegetal y Carbonización

El carbón vegetal es el residuo sólido que queda luego de someter la madera a la acción del calor, en ausencia de oxígeno, bajo condiciones controladas de tiempo y temperatura. El proceso de producción de carbón se denomina carbonización.

Las condiciones controladas de la carbonización implica un control de las entradas de aire en la zona de descomposición térmica. Este control depende del método de carbonización empleado y/o forma de calentamiento aplicada. Los rendimientos de carbonización son variables: en retortas de laboratorio se obtienen valores de 25 a 30%; en métodos de carbonización comercial con hornos, de 20 a 25% y en métodos artesanales de 10 a 20%.

Los productos de carbonización estan comprendidos por 3 partes:

productos de la fase sólida: comercialmente el más importante es el carbón vegetal. sin embargo, tambien se considera en esta fase a la carbonilla o cisco que es el carbón menudo (tamaño menor a 1 cm) y la brea sólidificada (*tar*);
productos de fase gaseosa: durante la carbonización se forman gases, producto de las reacciones pirolíticas en la madera. En un método comercial de carbonización estos gases se liberan al exterior. En esta fase se encuentran dos fracciones:

fracción de gases no condensables (GNC), a las condiciones ambientales del entorno de la carbonización, conformada por gases no combustibles (CO_2) y combustibles (CO, CH_4, C_2H_6).
fracción de gases condensables, a las condiciones ambientales; su condensación da lugar a la fase líquida.

productos de fase líquida: la recuperación de la fracción de gases condensables forma el licor piroleñoso, tambien denominado ácido piroleñoso por el pH bajo de esta fracción. Estos productos se obtienen cuando se incorpora un sistema de condensación de los gases que salen de la carbonización.

El proceso de carbonización que incluye un sistema de recuperación de gases condensables se denomina **destilación seca de la madera.**

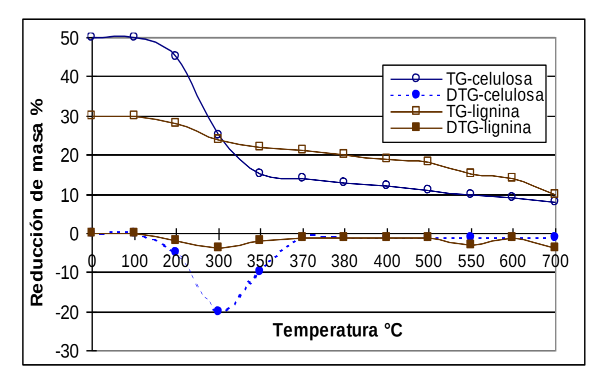
7.3 Etapas de la Carbonización

En cualquier método de carbonización, la temperatura interna de la madera debe pasar de la temperatura ambiente, al momento de la carga, hasta alcanzar la temperatura final. Esta elevación de temperatura permite que se sucedan los cambios físicos y químicos necesarios para el procesamiento de la madera. Una primera etapa debe permitir en la madera la eliminación del agua, de los extractivos volátiles y en seguida, las etapas posteriores son para la degradación térmica anaeróbica de los componentes mayores de la madera: de la holocelulosa y de la lignina. Además de la etapa de secado, se requieren al menos de otras cuatro etapas sucesivas definidas por la temperatura en la madera (ver figura 7.1):

Etapa I: etapa de secado, con una temperatura de la madera alrededor de 100°C. La madera se seca en esta etapa, además de eliminarse extractivos volátiles de punto de ebullición menor al de esta etapa. La temperatura externa a la madera, dentro del sistema puede ser de 280°C. La etapa es endotérmica.

Etapa II: La temperatura en la madera sube de 100 a 275°C. En esta etapa, entre 100 a 150°C, se elimina agua fuertemente retenida y extractivos volátiles de la madera. Asimismo, se inicia la descomposición térmica de la madera en ausencia de oxígeno a partir de los 200°C, aunque esta puede iniciarse ya a partir de los 150°C. Por la

descomposición térmica se degradan los carbohidratos de bajo peso molecular, principalmente las hemicelulosas, dando lugar a la formación de ácido acético y agua de reacción, estos últimos formando parte del licor piroleñoso. Tambien se forma cierta cantidad de gases no condensables: CO y CO_2. Al comparar entre las fracciones de carbohidratos, la velocidad de descomposición de las hemicelulosas es 12 veces más rápido que la celulosa. Durante esta etapa, parte de la madera, mayormente lignina, se transforma en brea primaria. (masa oscura y de apariencia vidriosa, formada por hidrocarburos pesados).



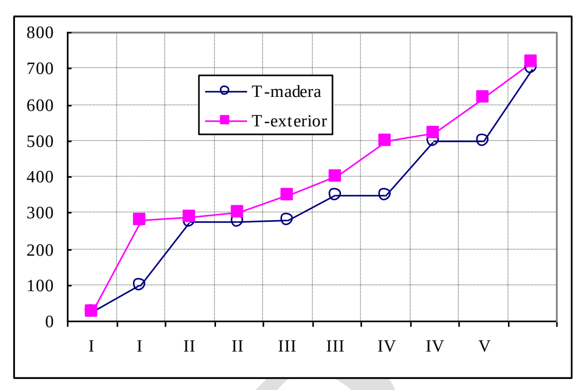
La temperatura externa en el sistema alcanza los 300°C; la etapa es endotérmica.

Etapa III: En esta etapa la temperatura se eleva de los 275°C hasta los 350°C. La descomposición térmica es mucho más rápida como resultado de las reacciones exotérmicas que se generan al interior de la madera. Los componentes celulosa y lignina se degradan con mayor facilidad. En la figura 7.2 se observa un esquema, por análisis termogravimétrico (TG), representando la descomposición térmica de la celulosa y de la lignina; en la figura se incluye las respectivas curvas diferenciales (DTG).

FIGURA 7.1: Variación de la temperatura durante la carbonización

FIGURA 7.2: Curvas TG y DTG de la Celulosa y de la Lignina

En la curva TG se observa la rápida descomposición de la celulosa, lo que se comprueba con la curva diferencial DTG respectiva. En el caso de la lignina, si bien hay un aumento en la tasa de descomposición en esta etapa (curva DTG de la lignina), esta es mínima en comparación a la celulosa. La mayor parte de la lignina pasa a formar parte de la masa del carbón vegetal. En esta 3ra etapa se forma con mayor intensidad el licor piroleñoso que contiene principalmente ácido acético, alcohol metílico y alquitrán. Asimismo, la brea primaria de la etapa anterior se transforma en una brea secundaria o coquificada: este es el carbón vegetal. Tambien continúa la formación de los gases no condensables: CO, CO_2, CH_4, C_2H_6 y C_2H_4. La energía liberada producto de las reacciones exotérmicas que ocurren al inicio de esta etapa permite que la temperatura interna de la materia



carbonizada alcance un valor de 350°C; sin embargo la temperatura externa, dentro del sistema, es de alrededor 400°C.

Etapa IV: El carbón formado de la etapa anterior se consolida en una cuarta etapa, completándose el proceso de carbonización. Asimismo, continúa la formación de alquitranes pesados los que son evacuados hasta que alcanzen su punto de ebullición. La temperatura interna en esta etapa va desde los 350°C hasta 450°-500°C; la temperatura externa es de alrededor 500/550°C. La energía necesaria para esta etapa proviene de calor externo. La destilación de los alquitranes pesados es mínima; sin embargo el carbón vegetal obtenido al final de esta etapa contiene hasta 85% de carbono fijo.

Etapa V: Es una etapa opcional, endotérmica, con una temperatura interna que va desde los 500° a 700°C. El desarrollo de esta etapa garantiza la eliminación de la mayor parte de alquitranes pesados; de esta manera se obtiene un carbón vegetal, de buena calidad, con valores entre 90 a 95% de carbono fijo. Esta etapa no se aplica en los métodos tradicionales de carbón en razón de que encarece el producto final y disminuye el rendimiento de la carbonización. En la figura se observa las curvas de variación de la temperatura, interna y externa, durante las 5 etapas del proceso de carbonización.

7.4 Formas de Calentamiento

Para que se lleve a cabo la carbonización, existen dos formas de generar el calor y alcanzar la temperatura mínima del proceso:

Calentamiento interno.- Para alcanzar la temperatura de carbonización, parte de la madera u otra materia vegetal seca, se quema (combustión). Este permite la obtención de energía necesaria para elevar la temperatura en el sistema. Para que combustione el material vegetal o parte de la madera es necesario la entrada de aire al inicio de la combustión hasta que se inicie las reacciones exotérmicas de la carbonización.

Calentamiento externo.- En este caso, toda la energía necesaria para alcanzar la temperatura de carbonización proviene de una fuente externa. Es necesario que la madera a carbonizar se introduzca dentro de un recipiente que permita la conducción del calor. La fuente externa de energía proviene sea de una resistencia eléctrica o de la quema de un combustible (hulla, coque, leña, etc.). El recipiente utilizado, o retorta, debe presentar una abertura que permita la salida de los gases de la carbonización; la entrada de aire por esta abertura es impedida por la mayor presión de los gases de salida. El calentamiento externo permite la obtención rápida de un carbón vegetal de muy buena calidad; sin embargo, no es utilizado comercialmente. Para alcanzar temperaturas de carbonización en la retorta se requiere de 5-15 unidades de masa por cada unidad de madera a carbonizar en la retorta.

7.5 Ecuación de la Carbonización

El proceso de carbonización se puede resumir en la siguiente ecuación genenral de reacción durante la carbonización, propuesta por Klason, Novlin y Heidenstamm (1958):

$$2\ \mathbf{C_{42}H_{60}O_{28}} \longrightarrow 3\ C_{16}H_{10}O_2 + C_{23}H_{22}O_4 +$$

madera — carbón — alquitrán y breas

$$28\ H_2O + CH_3OH + 2\ CH_3COOH + 5\ CO_2 + 3\ CO$$

ácido piroleñoso — gases no condensables

De la ecuación se deduce, por relación de masas moleculares, el rendimiento teórico de conversión de madera a carbón vegetal es 34,7% con un contenido de carbono fijo de 82%. Un análisis elemental de la madera dió el siguiente resultado:

Elemento	Madera seca	Madera seca al aire
C	49	40
H	6	4,8
O	44	34,2 *
N	0,1	
Cenizas	0,6	1
H_2O	-	20

(*) O + N

7.6 Influencia de la Holocelulosa y de la Lignina sobre los Productos de Carbonización

Los productos de la carbonización estan influenciados obviamente por los componentes químicos mayores de la madera: celulosa, hemicelulosas y lignina. Como ya se ha explicado anteriormente, el carbón vegetal resulta de la coquificación de la brea secundaria: esta brea proviene principalmente de la lignina; sin embargo, parte de los carbohidratos tambien se transforma en brea. De la celulosa, a 275°C, se obtiene agua, CO, CO_2, metano, etileno, ácido acético y acetona, formaldehido, ácido fórmico, gases, alquitrán y algo de carbón. De las hemicelulosas se obtiene los mismos productos de destilación de la celulosa y furfural. De la lignina, seobtiene productos similares a los obtenidos de los carbohidratos además de metanol. En la tabla se observa valores aproximados de las fracciones que se forman durante la carbonización, por separado, de la holocelulosa y de la lignina; ver cuadro 7.2.

CUADRO 7.2 Fracciones de la Carbonización de Holocelulosa y de Lignina

FRACCION	Celulosa	Hemicelulosas	Lignina
Carbón	5	10	55
Alquitrán	66	64	15
Líquido	23	18*	20
Gas	6	8	10*

fuente: Shafizadeh-Chin (1977)
* valores estimados por diferencia de 100

De los valores del cuadro se deduce que se obtiene una mayor cantidad de fracción carbónacea a partir de la lignina que de la holocelulosa. Sin embargo, la mayor cantidad de fracción de breas y alquitranes proviene de la holocelulosa. Esta información demuestra que existe una relación directa entre el contenido de lignina de la madera con el rendimiento de la carbonización. En el caso del alquitrán, este producto se compone de hidrocarburos pesados y también de compuestos fenólicos que le dan el color oscuro característico del alquitrán de madera. Una lista de productos químicos provenientes de los componentes luego de la carbonización se presenta en el cuadro 7.3.

CUADRO 7.3 Componentes de las Fracciones Líquida y Gaseosa de la Pirolisis de Holocelulosa y de Lignina

COMPOSICIÓN	Holocelulosa*	Lignina
Fracción Liquida		
	Acetaldehido	
	Furano	
	Metanol	Metanol
	Butanodiona	
	Propanona	Propanona

	Ac. Acético	Ac. acético
	Furaldehido	
	Agua	Agua
Fracción Gaseosa		
	CO_2	CO_2 , CO
	CH_4, C_2H_6	CH_4, C_2H_6

La carbonización de maderas latifoliadas rinde doble de metanol que las maderas de coníferas: esto se explica por la presencia de mayor cantidad de grupos metoxilos en la lignina de las maderas de latifoliadas. El metano en la fracción gaseosa proviene de los grupos metoxilos de la lignina. En el caso del ácido acético, hay una influencia de los grupos acetilos en las hemicelulosas.

7.7 Influencia de las Características de la Madera durante la Carbonización

En principio, cualquier madera puede ser utilizada para la fabricación de carbón; sin embargo, la calidad y el rendimiento de carbón dependerá del tipo de madera utilizada y sus características. Los tiempos de carbonización por lo general dependen del tamano de la madera, de su humedad, de la especie, de las condiciones atmosféricas además de la carbonera o método empleado.

Influencia de la humedad.- La madera a carbonizar debe estar preferentemente seca al aire. Un contenido de humedad elevado en la madera retarda el tiempo de carbonización y consume energía del sistema. Asimismo, la elevada humedad de la madera contribuye a la formación de rajaduras y fraccionamiento del carbón; este defecto depende tambien de la velocidad de calentamiento que a su vez se relaciona con el método de carbonización utilizado. Durante la 1^{ra} etapa del proceso, con una madera muy húmeda, sobre el punto de saturación de las fibras, por el secado rápido se generan tensiones internas en la madera cuya magnitud esta en función de la tasa de eliminación del vapor. Las tensiones generadas contribuyen a la contracción violenta, formación de fisuras y el consiguiente resquebrajamiento de la estructura cada vez debilitada de la madera a medida que va aumentando la temperatura interna. La utilización de madera muy húmeda en la carbonización produce un carbón con muchas fisuras, frágil y alta tendencia a la formación de partículas pequeñas de menos de 1 cm^3 de dimensión promedio (carbonilla). Para reducir la humedad de la madera antes de carbonizar se utiliza los gases calientes de los hornos de carbonización.

Influencia de las Características de la Especie.- Para la carbonización hay siempre preferencia por la maderas duras en razón que estas dan un carbón compacto y durable cuando se usa para energía. Además, en muchas especies de maderas duras el porcentaje de lignina es relativamente alto lo que influye en el rendimiento de carbonización. Las especies preferidas para elaborar carbón vegetal son aquellas con valores de densidad básica mayor a 0,5. Un caso particular es la madera de algarrobo (*Prosopis pallida*) que crece en la costa Norte del Perú. Los rendimientos de carbonización obtenidos en laboratorio son altos (mayores a 35 %); estos resultados estan influenciados por el alto contenido de lignina en su madera, en muchos casos cercanos al 40%, tal como se comprobó con los análisis respectivos. La madera del algarrobo es una especie bajo control debido a su tala indiscriminada destruyendo rapidamente el ecosistema de desarrollo de los algarrobales. Los productores de carbón de la zona suelen preferir la madera del algarrobo para elaborar carbón debido a la buena calidad del mismo: existe una preferencia de los consumidores por este tipo de producto.

La presencia de los extractivos en la madera tambien influye en el rendimiento de carbonización: muchos de los extractivos volatilizan antes de alcanzar la temperatura de la 3^{era} etapa de la carbonización (275°-280°C). Al volatilizar los extractivos, el rendimiento en carbón disminuye pero aumenta el del licor piroleñoso. Particularmente en el caso de maderas con alto contenido de taninos, su presencia es perjudicial cuando se utilizan hornos de metal para la carbonización: hay una reacción entre los componentes químicos de los taninos y el hierro utilizado en la construcción del horno.

La estructura anatómica de la madera tambien influye en el rendimiento de carbón: maderas con alto contenido de parénquima y tejido medular dan un bajo rendmiento de un carbón frágil y poco denso. Las células de parénquima son débiles, comparadas con las fibras xilemáticas, y se degradan rápidamente en las primeras etapas de la carbonización. La presencia de corteza, junto con

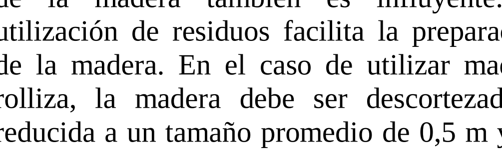
la madera, tambien influye en un rendimiento bajo de un carbón frágil y quebradizo además de aumentar el porcentaje de cenizas. La corteza debe ser evitada como materia prima de carbonización, salvo que se le utilize como material energético para elevar la temperatura en las primeras etapas con calentamiento interno.

Una característica que tiene el carbón vegetal es que, a pesar que los componentes químicos de la madera se transforman y obviamente la de los elementos anatómicos, la distribución de los elementos se mantiene en forma simétrica, aunque proporcional a la reducción de volumen luego de la carbonización. Es asi que se observa, sobretodo en carbón de maderas latifoliadas, la misma distribución de poros y otras características perceptibles en la superficie. Esta cualidad se utiliza para identificar la especie utilizada en la obtención del carbón (Pipa, Chavesta, Gonzales, 2007).[16]

7.8 Preparación de la Madera para Carbonización

La madera para carbonización debe ser en principio de bajo costo. Según los precios de madera en el mercado local, el carbón producido debe competir con ventajas frente a los sustitutos: esto dependerá principalmente del precio de la madera. Un primer criterio que influye es la extracción de especies forestales sin valor comercial, es decir especies no utilizadas por otras industrias forestales; sin embargo, los costos de extracción y transporte afectarian los costos. Una ventaja de la extracción primaria de la madera es el aprovechamiento de ramas y árboles torcidos; asimismo se puede utilizar sistemas portátiles de carbonización afin de reducir los costos de transporte por peso.

La utilización de residuos de industrias forestales es una buena alternativa de madera de bajo costo para carbón. La preparación de la madera se inicia por la selección de la especie: maderas duras dan un carbón compacto y de mejor calidad que maderas suaves. El tamaño de la madera tambien es influyente: la utilización de residuos facilita la preparación de la madera. En el caso de utilizar madera rolliza, la madera debe ser descortezada y reducida a un tamaño promedio de 0,5 m y un valor máximo 1 m de longitud. El diámetro máximo recomendable es 30 cm; trozas de dimensiones mayores deber ser partidas longitudinalmente en 2-3 secciones. Posteriormente, la madera, de ser necesario, debe ser estacionada para reducir el contenido de agua: valores de humedad menores a 20 % (bmh) son recomendables antes de iniciar la carbonización.



7.9 MÉTODOS DE CARBONIZACIÓN

Todos los métodos de producción comercial de carbón utilizan la forma de calentamiento interno. Esto permite un ahorro de energía durante la carbonización. Se distinguen 3 métodos de carbonización:

fosas: sistema bajo el nivel del suelo
parvas: sistema sobre el nivel del suelo
hornos: con dos variantes:
hornos metálicos
hornos de ladrillos

7.9.1 Método de Fosas

Corresponde a excavaciones, bajo el nivel del suelo, de 1,0 a 1,8 m de profundidad , de 1 a 3 m de ancho y de 3 hasta 20 m de longitud. La madera preparada es colocada debidamente dentro de la fosa, dejando vias para la circulación de gases. La madera es cubierta con material vegetal seco como hojas secas, ramas, corteza, etc. Sobre esta capa se cubre con tierra de textura franco arenosa. el uso de este método es limitado a zonas con suelos secos y napa freática profunda. La capacidad neta de este método varia de 3 a 60 m3 st. Las fosas son sistemas de carbonización de bajo costo: no existe un costo fijo de inversión en equipos, salvo los destinados a la compra de herramientas manuales de preparación de madera y de preparación de la fosa (palas y picos); los costos variables incluye la mano de obra. A pesar de la economía de elaboración de las fosas, el carbón obtenido con este método presenta desventajas:

- los ciclos de carbonización son largos, variable de 30 a 90 días, según la capacidad de la fosa;
- hay mucha variación de calidad en una misma carga de carbón obtenida. En fosas grandes, la circulación del aire es dificultosa, lo que provoca combustión en zonas de entrada de aire y carbonización incompleta en el interior de la fosa.
- El material volátil en el carbón es alto, 15-25%, como consecuencia de la reabsorción de gases condensables al interior de la estructura del carbón. En la fosa siempre hay dificultad de evacuación de los gases de carbonización.
- La reabsorción de los gases aumenta la acidez en el carbón: esto afecta a las bolsas utilizadas para el embalaje del carbón.
- Altos valores de cenizas en el carbón que se incorporan durante la descarga.
- Mala calidad del carbón: el contenido de carbono fijo es menor al 75 % .
- Alto porcentaje de carbonilla por la dificultad en la manipulación del carbón durante la descarga.
- Valores bajos de rendimiento neto de carbonización, entre 10 a 23%.
- Eventualmente requiere de mucha mano de obra para la contrucción de fosas de gran capacidad

las desventajas mencionadas para el carbón de fosas limita su uso como producto energético (cocinas) y para la elaboración de briquetas.

En la figura 7.3,se observa un esquema gráfico de la produccoón de carbón en fosa.

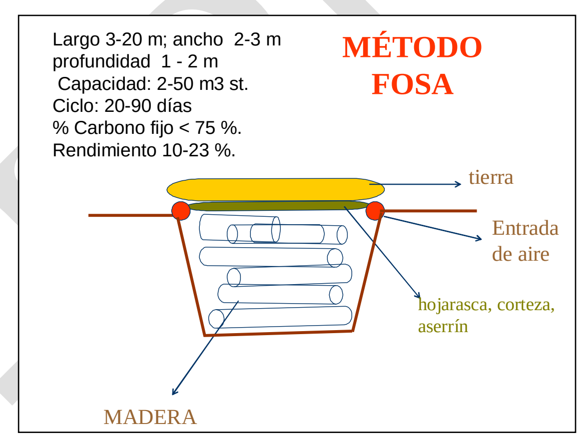


FIGURA 7.3 : Diagrama de producción de carbón vegetal en fosa

7.9.2 Método de Parvas

En este caso, se arma una pila de madera, sobre el suelo, cubriéndose luego con hojas o ramas secas y sobre esta capa, tierra. Este método se utiliza en lugares donde el suelo es compacto y donde el drenaje es malo o la napa freática esta cerca del nivel del suelo. Las dimensiones de un parva varian de 1,5 a 2,5 m de altura, de 2 a 3 m de ancho y de 2 a 8 m de longitud. Una parva de forma circular puede tener de 2 a 3 m de diámetro. La capacidad neta de una parva varia de 3 a 30 m3 st; el ciclo de carbonización dura de 10 a 40 días. Comparando con el método de fosas, la parva resulta ser versátil durante su construcción, aunque la calidad del carbón es muy variable: el contenido de carbono fijo varia de 55 a 80%. El resto de características del carbón de parva es similar al descrito para carbón de fosa: alto contenido de material volátil, de cenizas, de carbonilla. Tambien en el método de parva hay dificultad de circulación de aire y de evacuación de los gases de la carbonización. Los rendimientos netos de

carbonización en parva son variables, de 10 a 20 %.; ver figuras 7.4 y 7.5.

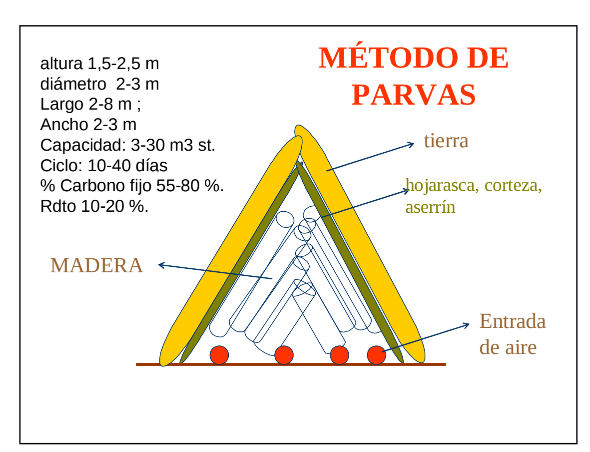


FIGURA 7.4: Diagrama de producción de carbón vegetal en parva



FIGURA 7.5: Parvas para producción de carbón vegetal en Manantay, Pucallpa.

7.9.3 Hornos de Carbonización

En líneas generales, el carbón vegetal de hornos es de mejor calidad, comparado con el carbón producido por los métodos anteriores; sin embargo, los hornos requieren de un costo de inversión para la construcción. El horno tiene una vida útil que varia con la calidad del material utilizado para construir el horno.

7.9.3.1 Hornos Metálicos

Si bien existen refrencias de hornos metálicos fijos, este tipo de hornos son transportables, dándole mayor versatilidad a las operaciones necesarios para ejecutar la carbonización. Como hornos metálicos se pueden utilizar los cilindros vacios que se utlizan para envasar lubricantes, aunque su capacidad es muy limitada, 0,2 m3, requiriendo ademas de calentamiento externo. El modelo de horno metálico más utilizado en la actualidad es el horno TPI, del *Tropical Products Institute*. Este modelo de horno fue desarrollado en los años 30, en Europa. El horno TPI consta de 3 partes principales: 2 secciones cilíndricas (basal y superior) y una sección cónica superior. Las características de construcción estan ampliamente descritas en el manual "Métodos Simples para Fabricar Carbón Vegetal", FAO, 1983. En la construcción del horno TPI (ver figura 7.5) se resalta:

se utiliza una lámina de acero de 3mm de espesor en la sección cilíndrica basal. Para la sección superior y cónica se utiliza lámina de acero de 2mm de espesor.
las dos secciones cilíndricas del horno son montables una sobre la otra. La sección basal presente en el borde un perfil de hierro de 50 mm que le permite soportar el peso de la sección superior y la tapa cónica.

El horno requiere de ocho tubos para entrada de aire/salida de gases; los tubos tienen una longitud, c/u, de 2,3 m de longitud. El tubo se coloca en la base del horno, conectado a una pequeña canaleta metálica que sirve de base a la sección cilíndrica basal. Los tubos y canaletas se colocon de manera equidistante en la base del horno.
sobre la tapa cónica del horno hay cuatro aberturas, con tapa, que facilitan la salida de los gases de la carbonización.

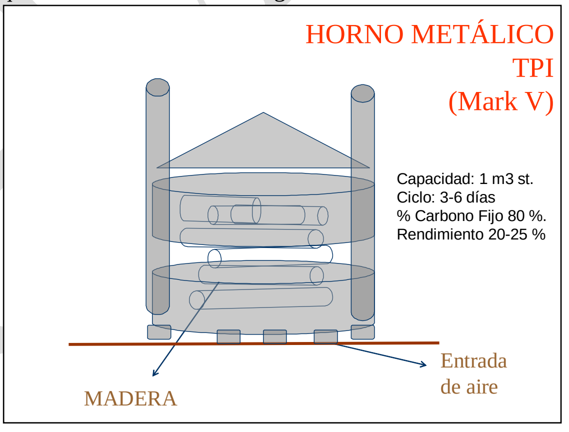


FIGURA 7.5: Diagrama de producción de carbón vegetal en horno metálico

El horno metálico presenta varias ventajas, comparado con otros métodos de carbonización:

- hay una carbonización homogénea, producto de una mejor circulación de aire y gases de carbonización;
- es un horno fácil de instalar y requiere de poco personal para su instalación y supervisión;
- los ciclos de carbonización son cortos: de 4-6 días;
- son transportables, permitiendo su instalación cerca a las fuentes de materia prima;
- hay poca contaminación del carbón con la tierra;
- el rendimiento de carbón es alto: de 20 a 25%;
- el carbón obtenido es de buena calidad: carbono fijo promedio de 80% y material volátil menor al 15%. La calidad del carbón lo hace más versátil en sus usos;

Pero se presentan las siguientes desventajas:

- El costo de inversión es alto, por la calidad del acero utilizado en su construcción. Una inversión mínima de

construcción esta sobre los 350 $US por un horno;

- Hay dificultad para la recuperación de los gases condensables;
- Por las paredes metálicas del horno, hay influencia de la temperatura ambiental en zonas de climas fríos. Las temperaturas externas alargan el período de carbonización o hacen variar la calidad del carbón en una carga.
- El horno metálico se corroe rápidamente por efecto de los gases ácidos del proceso. Se puede utilizar un mejor acero de construcción, pero aumentando el costo respectivo.

Los hornos metálicos TPI producen de 500 a 800 kg de carbón por cada ciclo. la vida útil del horno, según el tipo de acero empleado, varía de 2 a 3 años (86-108 semanas). Para un programa de producción de 600 t de carbón vegetal por año se hizo la siguiente estimación, con dos especies forestales:

Madera	**Algarrobo**	**Eucalipto**
Rdto. Carbonización	20-25 %	20-25%
Producción carbón	600 t/año	600 t/año
Consumo Madera seca	2400-3000 t	2400-3000 t
Densidad básica	0,85	0,56
Volumne m³(r)	2823-3529	4286-5357
m^3 (st) f=0,9	3137-3921	4762-5952
Carga m³(st)/ciclo	1	1
total ciclos promedio	3529	5357
# ciclos/año/horno	45	45
N° hornos necesarios	78,4 ≈ 79	119

7.9.3.2 Hornos de Ladrillos

Este tipo de horno, de instalación fija, son construidos con ladrillos que se fabrican localmente; los ladrillos contribuyen a un mejor aislamiento del sistema, favoreciendo los rendimientos elevados de carbonización: de 20 a 26%. Los hornos de ladrillos presentan una gran capacidad de producción, variando con el modelo empleado. Comercialmente se conocen 4 modelos de hornos de ladrillos para la producción de carbón vegetal:

a) Hornos tipo media naranja

Modelo de horno diseñado en Argentina. Es un horno construido en forma semi-esférica, con un diámetro de 6 m. El ciclo de carbonización dura 15 días, para una producción de 7,5 t de carbón por ciclo y un rendimiento neto de 26%; ver figura 7.6.

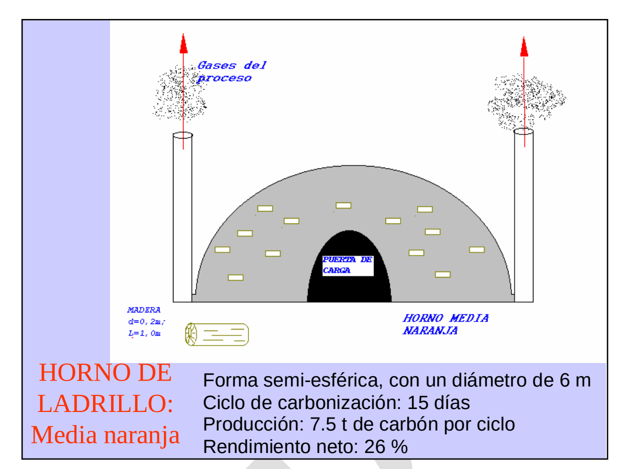


FIGURA 7.6: Diagrama de producción de carbón vegetal en horno media naranja

Una variante del horno ha sido desarrollada en la zona maderera de Pucallpa, tal como se observa en la figura 7.7.



FIGURA 7.7: Diagrama de producción de carbón vegetal en horno ladrillo, Pucallpa.

b) Horno colmena

Este es un modelo diseñado en el Brasil. La forma del horno es de una base cilíndrica y la parte superior semiesférica. El diámetro de este horno es 5 m y tien un volumen efectivo de 45 m3. El ciclo de carbonización dura de 9 a 12 días y una producción de 4 a 6 t de carbón; el rendimiento de carbón es de 22 a 26%. La vida útil media del horno es de 6 (5 a 8) años y el costo de construcción estimasdo en 600-700 $US por horno.

c) Horno colmena para colina

Es una variante del modelo anterior que se utiliza en zonas colinosas. El diámetro del horno es de 4 m y su volumen efectivo 21 m^3. Este horno se apoya en una lado de una colina, facilitando la construcción del horno.

d) Horno Missouri

Es un modelo diseñado en los EE.UU. Es un horno de una gran capacidad media: 180m^3, aunque se diseñan con una capacidad hasta de 350 m3. En el diseño promedio del horno, la base es rectangular de 7 x 11 m y 2,5 m de altura; el espesor de la pared del horno es de 250 mm. Para su construcción, por su diseño y tamaño, se requiere de material noble: cemento y ladrillo. La principal ventaja de este modelo de horno es la facilidad para la carga y descarga, mecánica, del carbón producido. El ciclo de carbonización dura 30 días.

Al igual que los otros métodos, los hornos de ladrillos presentan ventajas comparativas:

- El carbón de hornos de ladrillos es de buena calidad: se obtiene con valores de carbono fijo mayor a 80%, aumentando los usos del carbón;
- la carbonización se efectúa en forma homogénea, con buena circulación del aire y los gases formados;
- los ciclos de carbonización son menores que los de otros métodos (fosas y parvas);
- la vida útil del horno es mayor que los hornos metálicos;
- los hornos media naranja y colmena pueden ser desmontados y reinstalados en otro lugar, con los mismos materiales.
- Son reparables;
- Son hornos de gran robustez y con buena capacidad de aislamiento y protección;
- Los ladrillos para los hornos pueden ser construidos localmente, abaratando los costos de su fabricación;
- los rendimientos en todos los hornos de ladrillos son mayores a 20%.

Pero, como en todos los casos, hay desventajas:

- Hay un alto costo de construcción del horno. Un horno colmena tiene un costo de alrededor 600$US c/u.
- comparado con los hornos metálicos, el ciclo de carbonización es mayor;
- su instalación requiere de una planificación previa de abastecimiento de madera que garantize la recuperación de la inversión. En este caso, es preferible su instalación cerca a las fuentes de abastecimiento de madera: cerca a los bosques o a otras industrias forestales. Los planes de producción de carbón en hornos de ladrillos suelen considerar la construcción de baterias: conjuntos de 4-20 hornos por bateria.

7.9.4 Ciclo de Carbonización

En todo sistema de carbonización, utilizando métdos de producción comercial, se distinguen diferentes períodos de trabajo, desde la carga de madera hasta la descarga del carbón. Los períodos de un ciclo de carbonización incluye:

a) Construcción: solo en en el caso de fosas y parvas;
b) Carga de madera en el horno, fosa o parva;
c) Encendido de la carga hasta que alcanze las temperaturas necesarias en las primeras etapas endotérmicas del proceso
d) Control de entradas de aire; se cierran las entradas permitiendo el ingreso de una mínima cantidad de aire. La carbonización se desarrolle solo por las reacciones exotérmicas de la 3ra etapa. El sistema no se encuentra presurizado, pero la presión generada por los gases que se liberan impide el ingreso del aire al interior. En la práctica, los operadores suelen diferenciar las diferentes etapas por el color y olor de los gases de la carbonización.
e) Ingreso de aire, necesaria para elevar la temperatura en la 4ta etapa endotérmica.
f) Fin de la carbonización: se identifica esta etapa por el color del gas que sale, humo tenue azulado, identificando el final del proceso. En este caso, todas las entradas de aire son cerradas.
g) Enfriamiento: depende del método utilizado. Los tiempos de enfriamiento van de mayor a menor en el siguiente orden: fosas - parvas - hornos de ladrillos - hornos metálicos.
h) Descarga del carbón. Incluye tiempo para clasificación y embolsado del producto.

7.10 Características del Carbón Vegetal: Evaluación de Calidad

a) Apariencia

Un buen carbón vegetal, por apariencia, es quebradizo, de color negro brillante y suele dar por golpe un sonido metálico. su peso es ligero, en comparación con la madera.

b) Composición

La calidad del carbón vegetal se suele evaluar por sus componentes: carbono fijo, los materiales volátiles, las cenizas y humedad. Los tres primeros son características inherentes a la materia prima y al método de carbonización.

b.1 Carbono fijo (CF)

Es considerado el componente principal del carbón vegetal y teóricamente corresponde a carbono puro. Los valores medios de CF varian de 60 a 80%. Los valores de CF estan en relación directa

con la calidad del carbón. Durante la carbonización, Los valores de CF suben con la temperatura, tal como se muestra en los siguientes valores (FAO)[17]:

Temperatura (°C)	CF %
280-380	78
380-500	84
700-900	91

Otras variables que influyen en los valores de CF son el método de carbonización, el tiempo, la especie, % de carbono en madera, etc. El porcentaje de carbono en madera es aproximadamente 50% (bms); comparando con los valores de rendimiento (menores a 30%) , se estima que el resto de carbono se oxida y se pierde en la carbonización. Con una carbonización lenta y alta temperatura el CF alcanza valores de 90%. El caso contrario ocurre con una carbonización rápida y baja temperatura.

b.2 Material volátil (MV)

Formado principalmente por hidrocarburos (breas y alquitranes) de alto peso molecular. Los valores altos de MV indican, para la mayoría de sus usos, una mala calidad de carbón. Los valores de MV disminuyen con la temperatura; tambien tiene influencia el método de carbonización. Por lo general, en métodos con hornos, los valores de MV varian de 10 a 15%. En métodos de fosas y parvas, los valores de MV pueden llegar hasta 40%; en estos métodos la dificultad de evacuación de los gases permite la absorción de una mayor cantidad de alquitranes en la estructura de carbón.

El análisis de material volátil en laboratorio se obtiene calentando, sin contacto con aire, una muestra de carbón a la temperatura de 900°C por un tiempo de 7 minutos. El MV desaparece antes de empezar la oxidación del carbón

b.3 Cenizas (Cz)

Los valores de cenizas en el carbón estan en relación directa con las cenizas de la madera; los valores normales de Cz varian de 1 a 5%. En el caso de fosas y parvas, los valores de Cz suelen ser altos debido a que, durante la carga y descarga, componentes del suelo o tierra se mezclan con la madera o carbón, respectivamente; en este caso, se pueden alcanzar valores de Cz mayores a 20%. La presencia de iones metálicos induce a la formación de cenizas durante la carbonización.

b.4 Humedad (H)

Luego del proceso, el carbón pierde la capacidad de higroscopia por la eliminación de los radicales OH; el valor de humedad del carbón dependerá entonces de la porosidad y de las condiciones ambientales. En promedio, los valores de humedad no deben ser mayores a 5 %; para fines industriales, la humedad es inferior a 4%. En laboratorio, los valores de H del carbón vegetal varian de 1-2 %. En ciertos casos, se encuentran carbones con valores de H mayores a 10%; estos casos corresponden a adulteraciones comunes durante la comercialización. Por apariencia es difícil distinguir un carbón seco de un carbón húmedo, salvo que se recurra a una prueba de control.

b.5 Otros elementos

Se menciona a elementos que aparecen en trazas o valores mínimos en la composición del carbón vegetal. En este caso se menciona a:

- azufre: variable entre 0,03 a 0,35%; este elemento en coque varia de 0,5 a 1,0%.
- fósforo: de 0,01 a 0,03 %

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN

Para el análisis se aplica el esquema de muestreo mostrado en la figura 7.8. la toma de muestra se realiza luego del acondicionamiento del carbón al aire libre.

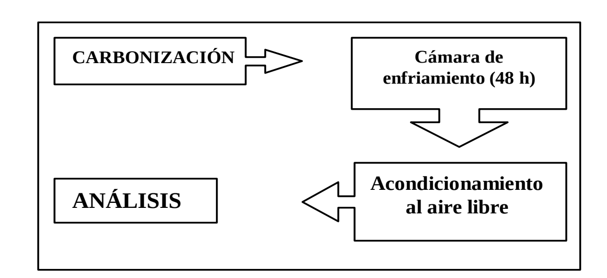


FIGURA 7.8: Esquema a seguir en muestreo para análisis de carbón vegetal

El análisis principal, del carbono fijo, se obtiene por diferencia porcentual de los demás componentes. El calculo de CF se realiza aplicando la fórmula siguiente:

$$\%CF = 100 (\%H + \%MV + \%Cz)$$

El análisis, según norma ASTM D1762, no considera la humedad, para el calculo de CF:

%CF = 100 (%MV + %Cz); (ASTM 1762)

Dependiendo de la fórmula utilizada, se debe evaluar la fórmula de cálculo de MV, Cz y H: en el método ASTM, la base de calculo es sobre base seca.

c) Poder calórico (Pc)

El poder calórico del carbón vegetal es equivalente a las calorias que aporta la oxidación de su contenido de carbono fijo, aunque el material volátil aumenta ligeramente la energía liberada. Las evaluaciones del poder calórico se obtienen con ayuda de un calorímetro. La reacción de oxidación del carbón es:

$$\underset{(12)}{C} + \underset{(32)}{O_2} \Rightarrow CO_2 + 94,45 \text{ kcal}$$

Y la relación Pc = 94,45/12 = 7,87 kcal/g

Pc = 7870 kcal/kg

El poder calórico del carbón tambien es un indicador de calidad del carbón. Tal como ya se menciono en el capítulo anterior, el uso del carbón vegetal como recurso energético sólo se justifica con un costo bajo de producción y en regiones con poco acceso a fuentes tradicionales de energía (zonas rurales alejadas en Sierra o Selva). El poder calórico del carbón vegetal varia de 6000 a 7000 kcal/kg. Los valores de poder calórico estan influenciados en forma directa por los valores de CF y MV. Algunos industrias (cemento) y para uso doméstico, se prefiere alto porcentaje de MV debido a que enciende fácilmente y se obtiene mayor poder calórico. FAO (1980) determina factores de equivalencia de 1000 kg de carbón vegetal con otros combustibles, tal como se menciona a continuación:

Equivalencia de 1000 kg de carbón vegetal	
Petróleo	550 kg
Electricidad	7260 kW-h
Carbón bituminoso (mineral)	830 kg
Madera seca (h=15%)	1650 kg
Madera verde (h=60%	2500 kg

e) Peso específico y Volúmen

Este valor es proporcional a la densidad de la materia prima; en la práctica la densidad del carbón varía de 0,2 a 0,4. A menores valores de temperatura de carbonización, el carbón es más denso debido a la mayor presencia de material volátil. El carbón de eucalipto (*E.globulus*, Db=0,56) obtenido a 450°C, con un rendimiento de 27,5%, tuvo una contracción volumétrica de 49,7 % y una densidad estimada de 0,31 g/cm³ (Remigio[18], 1983).

f) Superficie específica (SE)

Evaluada en m² por gramo de carbón, este valor aumenta con la temperatura de carbonización debido a la menor presencia de MV, derivados de alquitranes, que se depositan en los intersticios o espacios libres de la porosidad del carbón. El valor promedio de SE del carbón vegetal varía de 1 a 2 m²/g, pero con tratamiento especial (activación), la superficie aumenta de 100 a 1000 veces el valor original.En la figura 7.9 se observa una imagen de una partícula de carbón vegetal, mostrando su porosidad.

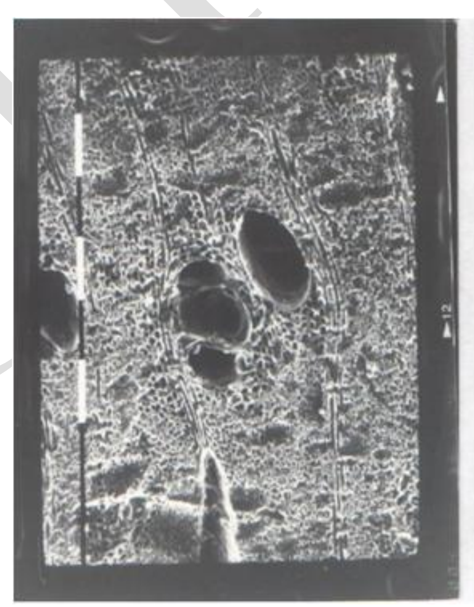


FIGURA 7.9: Imagen de partícula de carbón obtenido de madera de algarrobo (*Prosopis pallida*)

Tal como ya se mencionó, son las características de composición las que definen la calidad del carbón vegetal. Un anuncio de compra de carbón para metalurgia e industria química definió las características del producto:

- Carbono fijo mínimo 70%
- Humedad máximo 5%
- Material volátil (cisco) máximo 20%
- Cenizas máximo 5%

7.11 Usos del Carbón Vegetal

En la mayoría de los usos del carbón vegetal estan influenciados por los valores de carbono fijo: un buen carbón tiene valores altos de CF y bajos en los otros componentes. En ciertos casos, sobretodo en uso energético, puede haber influencia favorable de los componentes volátiles. Los usos más comúnes del carbón vegetal son:

- Como combustible, para gasógenos, usos domésticos (cocinas, parrilladas) y restaurantes (pollerías).
- Como materia prima para elaborar reactivos químicos: sulfuro de carbono, carburo de calcio, cianuros, etc.
- En metalurgia, para fabricación de acero y aleaciones de metales: actúa como endurecedor y separador.
- Para fabricar carbón activado, con una gran superficie de adsorción (SE: 300 a 2000 m²), utilizado como depuradores, decolorantes o filtros en fases líquida o gaseosa, adsorbente de gases, purificador de agua y licores, etc.
- Como polvo de carbón, aditivo en pienso para animales
- En forma de aglomerados o briquetas, de uso energético.

Las formas de uso del carbón vegetal, como briquetas, polvos u otro similar a la carbonilla, permite aumentar el rendimiento y mejor aprovechamiento de la materia prima.

7.11.1 Utilización como recurso energético

El uso del carbón vegetal es ventajoso, por su alto poder calórico, comparado con la madera; además el carbón, en condiciones normales se almacena con valores bajos de humedad, menos del 5 %, frente a los valores en madera, mayores al 10 %. Aunque el carbón enciende con dificultad, durante su combustión mantiene un fuego lento y homogéneo, sin liberar humos.

El carbón vegetal en fuego directo es muy utilizado para cocinar en restaurantes ("pollerías") y en barbacoas (BBQ) o parrillas de uso externo. Este carbón es muy apreciado por el gusto que otorga a los alimentos cocidos con este combustible. Esta característica es notoria en el carbón de algarrobo, razón que alienta su exagerada demanda; algo similar ocurre con el carbón de maple, en Québec, Canada[19].

El tamaño del carbón para este tipo de uso en cocinas es de un mínimo de 20 a 25 mm de lado, aunque en pollerías el tamaño demandado es mayor a los 50 mm de lado. La selección de tamaños se efectúa mediante el uso de tamices inclinados, con la abertura mínima, luego de la descarga del carbón. Los carbones de dimensiones menores a los 10 mm se consumen rápidamente durante la combustión, razón por las que no se prefiere su uso, salvo como forma de briquetas; ver figura 7.10.



FIGURA 7.10: sacos con carbón vegetal, de madera shihuahuaco, seleccionado, considerado de primera, Pucallpa.

La combustión del carbón, sin embargo, suele formar a temperaturas mayores a los 700 °C, el monóxido de carbono (CO) preferentemente al CO_2; el CO es un gas nocivo para la salud. La formación de este gas es favorecida por una disminución del oxígeno en exceso. Al igual que la combustión con madera, el uso del carbón vegetal en cocinas de uso interno es un potencial peligro para las personas que se ubican cerca[20] de la combustión del carbón. Una forma de control de la emisión de CO es mediante el uso de detectores de humo, específicos para este gas.

7.11.2 Utilización en Metalurgia

El uso del carbón vegetal en metalurgia es muy apreciado debido a la pureza del producto comparado con el carbón mineral. La ausencia de otros elementos, sobretodo del azufre, garantizan la calidad del carbón vegetal en la industria metalúrgica. El poder calórico elevado del carbón vegetal, sobre los 7000 kcal/kg, resulta ser una ventaja para el refinamiento de los metales o para

mantenerlos en estado líquido luego del colado. El tamaño requerido en el carbón vegetal, para este uso, varía de 20 a 90 mm (Huard, 1997).

7.11.3 Elaboración de Carburo

El carburo es un insumo utilizado en soldaduras. Producto de gran demanda, es elaborado en el Perú por dos empresas: Hornos Eléctricos Peruanos S.A. y Carbotérmica S.A. quienes abastecen al 50% del consumo local; el resto proviene de la importación de países de la región (Brasil, Argentina)[21]. El precio FOB promedio de producción varía de 0,4 a 0,5 $ US/kg. Para la obtención de carburo de calcio se recomienda un carbón de buena calidad elaborado en hornos (TPI o colmena).

7.11.4 Uso como Aditivo en Pienso para animales

Las características de adsorción del carbón vegetal es aprovechada cuando se le utiliza sólo o como mezcla de este producto en la alimentación animal, principalmente con aves, ganado porcino y bovino. El carbón vegetal molido actúa como una sustancia porosa capaz de captar elementos tóxicos del agua o de los alimentos; asimismo. el polvo del carbón adsorbe en su estructura a los gases del intestino y tambien retiene y neutraliza productos químicos, microbios y toxinas, reduciendo el riesgo de enfermedades de origen digestivo, infecciosa o parasitaria, en los animales que lo ingieren. Una mezcla apropiada del polvo del carbón es de 0,5 a 1 parte por cada 100 partes del alimento molido (Huard, 1997). El tamaño del carbón vegetal molido debe ser menor a 1 mm de lado.

7.11.5 Fabricación de Carbón Activado

El carbón vegetal es un sólido compuesto por hidrógeno, oxígeno y principalmente el carbono; el carbón tiene la capacidad de atraer en su superficie moléculas de gases. Este mecanismo de atracción se denomina adsorción y se da entre la superficie libre de un sólido y el gas. El carbón vegetal, tal como sale de los hornos, presenta valores máximos de superficie específica no mayores a los 2 m^2/g de carbón. Las partículas de carbón tienen, en su estructura interna, una gran cantidad de cavidades o intersticios que alojan el material volátil (sustancias alquitranadas) que se forma durante la carbonización; estas áreas tienen baja capacidad de adsorción.

Con la activación, el material volátil es eliminado por arrastre, dejando los intersticios libres, con el consiguiente aumento de la superficie específica que puede llegar a valores cercanos a los 2000 m^2/g. En la figura 7.11. se aprecia, como esquema, la ruta que sigue el material volátil al entrar en contacto con un gas caliente; se señala que la acción de gases calientes llevan a estado gaseoso al material volátil, evacuándolo del carbón, con el aumento de la superficie libre del sólido, tal como se representa al lado derecho de la figura.

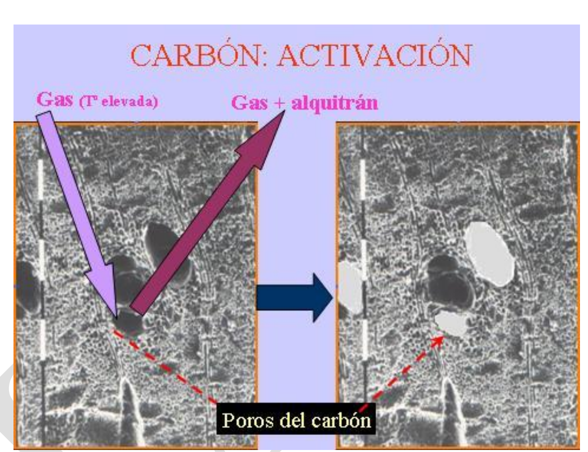


FIGURA 7.11: Esquema que representa la evacuación de material volátil durante la activación.

Los primeros reporte de fabricación de carbón activado son del año 1811, utilizándose huesos como materia prima; en 1822, se utilizó una mezcla de sangre con potasio la cual era calentada.

Para la activación se utiliza directamente el carbón o indirectamente através del uso del aserrín. Cuando se emplea carbón, la activación se realiza mediante la aplicación de gasees a temperatura elevada (método físico). El empleo del aserrín se hace con aplicación de sales (método químico). El carbón activado tiene un costo de producción no mayor de $0,3 US/kg; el carbón activado puede alcanzar valores comerciales de 20 a 25$US/kg. En la figura 7.12 se observa un diagrama de producción de carbón activado.

Activación física

Esta forma de activación es la mas utilizada. Se utiliza carbón vegetal granulado, obtenido a 400-600°C. El carbón es activdo haciendo pasar através de ella vapor de agua, dióxido de carbono o cloro, incluso gases de combustión, a temperaturas variables de 800 a 1000°C.

Activación química

Se obtiene mezclando el aserrín seco, con cloruro de zinc o ácido fosfórico.. La carbonización se realiza en una retorta a una temperatura de 500 a 900°C; a temperaturas altas, la activación es mayor. Luego se enfria y se lava el carbón para recuperar el agente activador. Luego, el carbón activado se filtra y se seca.



FIGURA 7.12: Diagrama de Producción de Carbón Activado.

Usos del Carbón Activado

Los usos del carbón activado dependen de su superficie específica, clasificándolo en:

- Carbón de fase líquida (SE hasta 1000m²/g): Se obtiene a partir de huesos, madera, turba, lignito, residuos de papel, etc. Se le utiliza para decoloración y refinación de azúcar, purificación de agua, clarificador de disolventes, recuperación de caucho, etc.

- Carbón de fase gaseosa (SE de 1000 a 2000 m²/g): es un carbón granular y denso. Se obtiene a partir de cáscara de coco, turba, carbón mineral y residuos de petróleo. Se le utiliza para recuperación de disolventes volátiles, purificación y separación de gases, aplicaciones catalíticas en industria química.

Otros usos del carbón activado son para desactivación de herbicidas del suelo, desactivación de insecticidas ingeridas por animales, tratamiento de alcantarillas, purificación de agua y suelo en general.

7.12 DESTILACION SECA

Según Panshing[22] (1959) la diferencia entre carbonización y destilación seca o d. destructiva esta en que esta última implica además de la producción del carbón la recuperación de los destilados (licor piroleñoso).

Las etapas de la destilación seca son las mismas de la carbonización. Los destilados se forman a partir de los 100°C (agua y volátiles de bajo punto de ebullición). Los otros destilados provienen principalmente a partir de las hemicelulosas (a partir de 200°C), de la lignina (entre 250 a 425°C) y de la celulosa (entre 290 a 340°C); Wenzl[23], 1970. Un esquema de la destilación seca y el procesamiento de los destilados es mostrado en la figura 7.13.

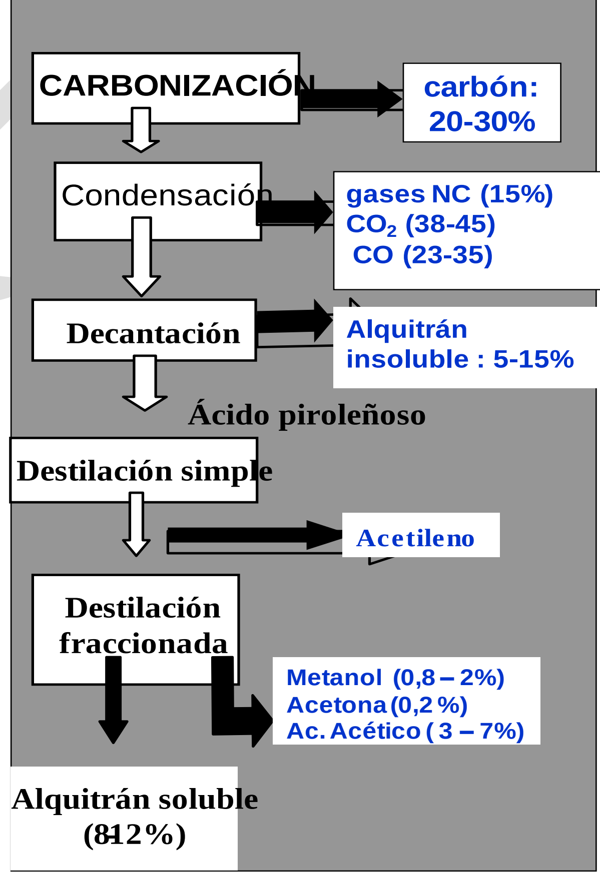


FIGURA 7.13: Esquema de los productos obtenidos por destilación fraccionada del licor piroleñoso

Las características de la madera para destilación

seca son las mismas que para la carbonización. La forma de calentamiento interna es la más conveniente. El método utilizado es el horno metálico a los cuales se les adapta tubos de metal para la evacuación de los gases hacia un sistema de condensación.

Un sistema de retorta metálica con calentamiento externo posibilita una buena recuperación de los destilados aunque el consumo de energía es elevado. Este método es conveniente en plantas piloto o equipos de investigación; una retorta de laboratorio de la UNALM con capacidad para procesar 2 kg de madera, consume 5 kg de leña para alcalnzar la temperatura de carbonización de 400-420°C. Cabe agregar que la condensación es más efectiva utilizando tubos metálicos debido a su mayor coeficiente de conductividad térmica; ver figura 7.14.



FIGURA 7.14: Retorta para Destilación seca

7.12.1 Productos de Destilación

7.12.1.1 Licor Piroleñoso

Tambien denominado ácido piroleñoso; según FAO (1983), es el nombre del condensado bruto de la destilación y se compone principalmente de agua y alquitranes, solubles en agua e insolubles, ácido acético, metanol, acetona, y en menor proporción acetato de metilo, acetaldehído, ácido fórmico, aldehído fórmico, etc. La composición y cantidades del licor piroleñoso varia en función de la especie utilizada. De igual modo, los productos de destilación son afectados por 3 factores importantes, Pino[24], 1987):

- tiempo de carbonización, relacionado con la velocidad de calentamiento que influye inversamente con el rendimiento de carbón pero directamente con la producción de alquitrán;

- temperatura, que influye directamente sobre la producción de los destilados;

- presión, con valores mayores a la presión atmosférica, aumenta el rendimiento de carbón pero disminuye la cantidad de destilados

Al variar especies para destilación seca, se ha observado relaciones directas entre la cantidad de licor piroleñoso y el contenido de polisacáridos (celulosa y hemicelulosas) en la madera.

El licor piroleñoso es un producto de pH ácido, corrosivo, nocivo y contaminante; estos efectos negativos se reducen en el medio ambiente cuando se recupera el licor para obtener subproductos o como combustible.

A. Composición del Licor Piroleñoso

Dentro de este producto se distinguen dos fases, a temperatura ambiente, al final de la destilación:

- Ácido piroleñoso, propiamente dicho, contiene todos los productos miscibles con agua como el ácido acético, metanol, y alquitrán soluble;

- Alquitrán insoluble, es la fase de mayor densidad que el anterior, más oscuro y viscoso, que se separa de la fase anterior por decantación.

Además del agua, que es el principal componente, la separación de los otros componentes del licor piroleñoso, en menor proporción, como el ácido acético, metanol o alquitrán, representó una actividad económica rentable hasta el desarrollo de la industria petroquímica. Sin embargo, el empleo de la madera en destilación seca no deja de ser una alternativa a futuro sea por la disminución de las reservas de petróleo o como una actividad adicional a la misma producción de carbón.

A.1 Alquitrán insoluble

Con un rendimiento (entre 5-15 % (bms), su máxima obtención se logra a la temperatura de 250°C (rango 150-400°C). Tambien denominado alquitrán de Estocolmo (FAO, 1983), químicamente de estructura compleja. Se le utiliza como preservantes de madera, en calafateo de barcos y tambien como material desinfectante por sus propiedades antisépticas. Por su apariencia, es

considerado un reemplazante del asfalto, aunque su bajo volúmen de producción es limitante para su uso. Otro uso es como aceite combustible, de buena calidad por la ausencia de cenizas y azufre, empleado en mecheros.

El alquitrán o brea de las maderas de latifoliadas se emplea para la obtención de creosota y guayacol. El guayacol es un fenol utilizado como ésteres (carbonato, fosfato) en farmacia por su calidad como antiséptico y anticatarro (Devore[25], 1976). La creosota oficinal se obtiene por rectificación del alquitrán entre 200 y 220°C. Un análisis de esta sustanciadetermina su carácter fenólico y la presencia de compuestos orgánicos, compuestos oxigenados, benzol, tolueno, xilenol, parafinas, fenol, cresol, pirocatequina, guayacol, furfural, etc. Este alquitrán, por ser un producto de rápida condensación, se les puede obtener fácilmente de los hornos metálicos y del sistema de parvas mejorado (Casamance; FAO-1983) con tubos metálicos instalados en las aberturas de salida de gases.

A.2 Alquitrán soluble

Corresponde a un alquitrán ligero que permanece soluble en el licor piroleñoso, con componentes de bajo peso molecular. Sus rendimientos varían de 8 a 12 % (bms).

A.3 Metanol (CH_3OH)

Producto utilizado como solvente industrial; proviene de los grupos metoxilos de la lignina. Los rendimientos de metanol varían de 0,8 a 2% (bms).

A.4 Ácido Acético (CH_3COOH)

Muy utilizado en la industria textil y plástica, fabricación de pinturas, como solventes, en farmacia, etc. Este producto proviene de los grupos acetil presentes en las hemicelulosas y en menor proporción de la c elulosa. Los rendimientos varían de 3 a 7% (bms).

A.5 Acetona (CH_3-CO-CH_3)

Usado mayormente como disolvente industrial; su origen puede deberse a la ruptura de los enlaces glucosídicos de la celulosa a temperaturas mayores a los 300°C. Su rendimiento es alrededor de 0,2% (bms).

A.6 Otros productos

Se encuentran otros productos de destilación como ácido fórmico(H-COOH), aldehído fórmico (HCHO), acetato de metilo (CH_3-COO-CH_3), acetaldehído (CH_3-CHO).

Valores de rendimientos de productos de destilación de 4 estudios diferentes son mostrados en el cuadro 7.3.

CUADRO 7.3: Productos de Destilación seca

Producto	Devore	Remigio*	CTFT	N.N.
Carbón	32-38	27,5		30
Metanol	0,8-2	1,66	1,02-1,94	1,5
Acetona	0,2	0,41	0,11-0,15	0,2
Ac.acético	3-7	6,27	0,21-0,75	6,8
Alq.soluble		7,16		19,0
Alq.insoluble	7-12	16,43		5,0
Agua	22-28	20,72		20,5
Acetato metilo		0,86		
Acetaldehído		0,39		
Guayacol			0,12-0,75	
Fenoles, cresoles			0,12-0,75	
Ac. fórmico				0,6
Ald.fórmico				1,0
Licor piroleñoso		53,90		
Gases NC	15	18,63		15,0

CTFT: Centre technique forestier tropical ; Pino (1987)

(*) madera de *Eucalyptus globulus* a 450°C (Remigio, 1983); Devore (1976); NC: no condensable; NN autor desconocido

7.12.1.2 Gases No Condensables

Formado por gases que no condensan a las condiciones ambientales; pueden ser combustibles o no. El rendimiento medio de estos gases es de 15% (bms) La composición de estos gases es la siguiente(FAO,1983):

GAS	% de volumen	% bms
CO_2	38-45	5,7
CO	23-35	3,45
Metano (CH_4)	3,5-17	2,55
Hidrógeno (H_2)	1-5	0,3
Etileno (C_2H_4)	2	0,3
Nitrógeno (N_2)	18	
Oxígeno (O_2)	2	

El nitrógeno y oxígeno provienen de la mezcla del aire con los gases de destilación.

El poder calórico de los gases combustibles varía de 2000 a 3000 kcal/m³, pudiendo alcanzar valores hasta de 4780 kcal/m³.

7.12.1.3 Cenizas

Residuo de la combustión completa, incluye elementos como calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, manganeso y ácidos salicílico y fosfórico. Se le utiliza como nutrientes para el suelo. Las cenizas representa menos del 1% (bms).

7.13 Analisis de costos en carbonizacion

Los análisis de costos de producción del carbón vegetal se efectúan en función del uso final del carbón y del método de carbonización. Los costos totales (CT) se determinan por la suma de los costos fijos mas los costos variables. Los costos fijos se consideran solo para los hornos, donde hay un costo fijo representado por la inversión en la construcción del horno. Una proporción de los costos de fabricación es la siguiente (FAO, 1980):

COSTO	%
madera al pie del horno	60
mano de obra	9
capital de trabajo	3,5
costos fijos	1,5
transporte del carbón	26

En carbonización, la madera utilizada se cubica como madera apilada siendo las unidades en el sistema métrico un m³ stéreo (1 m³ st) y en el sistema inglés una cuerda. Sus equivalencias son las siguientes:

- 1 m³ st = 0,62 a 0,68 m³ sólido (tocones)
- 1 m³ st = 0,40 a 0,60 m³ sólido (ramas)
- 1 m³ st = 0,2759 cuerdas
- 1 cuerda = 128 pies³ = 3,6246 m³ st

Un análisis de costos de producción de 8000 kg de carbón vegetal al mes, de producción en Huancayo y venta en Lima, fue el siguiente:

RUBRO	Intis (Oct-1986)
Inversión horno	12000
Costo madera	60/m3
Costo carga (5m³/carga)	300/carga
Costo (8 cargas/mes)	**2400/mes**
Operarios (2 x 1200/mes)	**2400/mes**
Depreciación 10%/mes	**1200/mes**
Consumo madera/mes	5 x 8 = 40m³/mes
Transporte madera	I/. 106/m³
costo/mes	**4240/mes**
Transporte carbón (Hyo-Lima)	1200/t **9600/mes**
COSTO TOTAL	19840/mes
Costo Unitario (en Lima)	2,48/kg
Precio venta (1986)	7,00/kg
Rentabilidad	182%

Referencia : 1 dólar = 16 intis

El análisis demuestra que, en el momento y según la demanda del mercado, la producción del carbón vegetal puede alcanzar rentabilidades altas.

Un estudio de comparación de costos de producción de carbón, destinado a la obtención de carburo, considera la información mostrada a continuación:

	TPI	Colmena
Capacidad madera	4 m³	45 m³
Rendimiento (%)	24	22
Producción (t/ciclo)	0,5	5
Ciclos/año	60	36
Producción anual	30 t	180 t
Costo construcción	$ 400	$ 700
Vida útil (años)	3	6
COSTO FIJO ($/ciclo)	2,22	3,25
COSTO VARIABLE		
Madera* ($/ciclo)	40	450
Mano obra** ($/ciclo)	114,3	205,7
COSTO TOTAL ($/ciclo)	156,52	658,95
Costo unitario ($/kg)	0,313	0,132

* costo 10$/m³; ** jornal 11,4$/día x 2 personas.

Vista la información del cuadro anterior, se demuestra la ventaja comparativa del menor costo del carbón obtenido en hornos tipo colmena, de gran capacidad, frente a los hornos portátiles. Aunque el costo mayor del horno colmena es una desventaja, sus ventajas se mantienen cuando existe una gran disponibilidad de materia prima.

7.14 La Carbonización en el Perú

A pesar de los variados usos, en el Perú es utilizado aún como un recurso energético; las estadísticas de producción muestran un elevado consumo de madera para leña y carbón. Hacia fines de los años 80, el consumo total de madera se estimaba en 4 millones de m³(r), de los cuales 2,8 a 3 millon correspondian a madera para leña y carbón; a fines de los años 90, se ha estimado que el total de madera es de 8 millones, de las cuales, alrededor del 77% se destina para leña y el 3% para carbón. Los métodos de carbonización más utilizados son las fosas y parvas: a un rendimiento menor al 15%, la producción paso de 8-10 mil t, en 1989, a cerca de 18 mil t, a fines de los 90; los valores de producción, en documento oficial, solo muestran menos del 50 % de la producción real de carbón. A nivel mundial, del consumo mundial de madera 3000 millones m³, 58% se destina para leña de la cual la cuarta se destina para producir carbón vegetal (400 millones m³).

El método de parvas para carbonización es utilizado en la zona norte del Perú (Piura y Lambayeque); la especie utilizada es algarrobo (*Prosopis* sp.). Esta género tambien aparece en la zona Sur (Ica y Arequipa) donde se le conoce como huarango. En ambos casos, norte y sur, la produccción excesiva del carbón, alentada por la cercania al gran mercado de Lima, favorece la rápida deforestación en los escasos bosques secos de la Costa peruana; ver figura 7.15



FIGURA 7.15: Producción de carbón vegetal en la zona de Lambayeque.

El método de fosas se utilizaba en la zona de la Sierra Central (Valle del Mantaro) con madera de eucalipto (*Eucalytus globulus*) proveniente de los aserraderos de la zona; se utlizan tambien trozas con defectos. En la misma zona, distrito de Sapallanga, existe un horno metálico modelo TPI, aunque su uso es irregular para producir carbón vegetal. La producción de carbón vegetal en la zona de Sierra Central es mínima en la actualidad, a causa de su costo de producción, mayor al carbón proveniente de la zona de Pucallpa y el que proviene del Norte peruano, además el mercado de Lima prefiere carbón vegetal provenientes de maderas duras (algarrobo, shihuahuaco). Hornos de ladrillo, tipo colmena se utilizaron, entre los años 1985 a 1990, 1 en Huancayo (1988) y 4 en Ambo-Huánuco, para producir carbón para la metalurgia; de igual modo se utilizó un horno tipo media naranja en Cajamarca (1987). En los últimos casos, la especie utilizada fue el eucalipto.

El método de parvas es el que mas se utiliza en la zona de Pucallpa, donde se emplean residuos de las industrias madereras de transformación mecánica, principalmente de las plantas parqueteras ver figura 7.16); esta es la principal forma de producción de carbón en la Selva peruana. El problema que genera esta forma de carbonización es el manejo de los residuos, efluentes y gases no recuperados que son causa de un impacto en el medio ambiente; en la figura 7.17 se observa residuos de carbón, y probablemente alquitranes condensados mu y cerca de la orilla del río Manantay, afluente del río Ucayali.

Un horno TPI, como parte de un programa de promoción estatal (INIA) se utilizó en la zona de Pucallpa y zonas aledañas; en la zona de Iscosazin, este horno se empleó para producir carbón como parte de un programa de aprovechamiento integral de un bosque tropical. Actualmente el horno no se utiliza, y más bien se encuentra en deterioro.



FIGURA 7.16: Producción de carbón vegetal con residuos de aserraderos, Pucallpa



FIGURA 7.17: Generación de residuos y efluentes de carbonización, en la zona del Manantay, Pucallpa

Los hornos colmena formaron parte de un programa de desarrollo energético y electrificación con gasógenos, por parte de Electroperú, en las zonas de Iberia, Iñapari, Chilina y San Lorenzo, en Madre de Dios; el proyecto no cumplió con sus objetivos.Los hornos de ladrillos,

modificados, se han utilizado en la zona de Pucallpa (25 hornos) en la producción de carbón de maderas de shihuahuaco y quinilla; esta producción se encuentra paralizada por cierre de la empresa maderera.

El mercado principal para el carbón vegetal esta en Lima; los usos principales son en la fabricación de reactivos químicos (caso de RENASA) en cocinas de restaurantes y pollos a la brasa. Otras formas de uso, en menor proporción, son para la elaboración de briquetas -aglomeradas con arcilla- (Puente Piedra) y producción de carbón activado (San Juan de Lurigancho). Las zonas de abastecimiento del carbón son la costa norte peruana y Pucallpa.

Las tendencias mundiales demuestran aún las ventajas comparativas del carbón vegetal en la industria. El Perú podría ampliar la capacidad productiva de este carbón con el fin de promover una industria carboquímica. Los lugares con capacidad de desarrollo son aquellos donde se hay actividad de extracción y transformación de madera; se menciona a las zonas de Junín, Huánuco, Selva Central, Oxapampa, Pucallpa, etc. como lugares apropiados para desarrollar una industria eficiente de obtención de carbón vegetal, aprovechando residuos forestales y empleando hornos como sistemas eficientes de producción. Asimismo, se recomienda evlauar la posibilidad de aprovechar los gases condensables, no necesariamente con fines de utlización económica, sino con el fin de reducir el efecto negativo en el medio ambiente a causa de los gases que se emiten durante el proceso.

7.15 PROBLEMAS

PROBLEMA 7.1

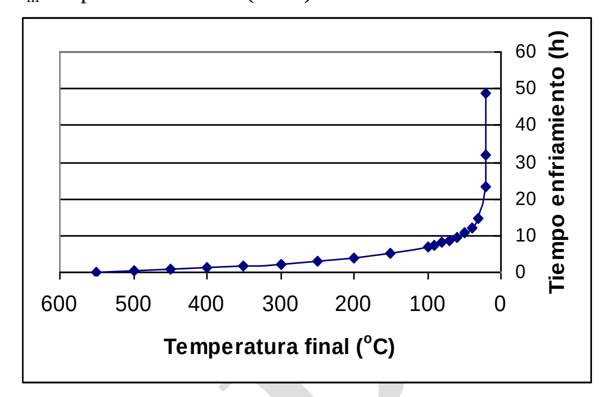
En un horno metálico TPI se carboniza madera a una temperatura máxima de 550°C. Luego de cuatro horas de enfriamiento, la temperatura llega a los 200°C. La temperatura del medio, alrededor del sistema de carbonización es de 20°C. Se pide calcular el tiempo óptimo para la descarga, sabiendo que se debe descargar el carbón a una temperatura media de 40°C.

Para el problema, se aplica la Ecuación, empírica, de enfriamiento, de Newton:

$$X_t = T_m + (X_o - T_m)\, e^{-kt}$$

donde:

X_t (200°C) temperatura luego del tiempo t (4 h)
T_m temperatura exterior (20°C)



X_o (550°C) temperaura inicial, al tiempo 0
k constante de la ecuación

Se reemplazan valores para hallar la constante k:

$$200 = 20 + (550 - 20)e^{-k(4)}$$

despejando valores $e^{-k(4)} = \dfrac{180}{530} = 0{,}3396$

por antilogaritmo se obtiene k = 0,26998 ≈ 0,27

de esta manera, la ecuación queda como sigue, para el horno TPI y las condiciones de trabajo especificadas:

$$X_t = 20 + (550 - 20)\, e^{-(0,27)\,t}$$

$$X_t = 20 + 530\, e^{-(0,27)\,t}$$

Si la temperatura en el tiempo t es 40°C, entonces, reemplazando valores en la ecuación:

$$40 = 20 + 530\, e^{-(0,27)\,t}$$

$$e^{-(0,27)\,t} = (20/530) = 0{,}0377358$$

y por cálculo de antilogaritmo

t = 12,138 = 12 h 08 min

Para enfriar el horno de los 550°C hasta la temperatura de descarga, se requiere un total teórico de 12 h y 8 minutos. La representación de la curva del tiempo de enfriamiento t (h) en función de la temperatura final Xt (°C) es representada en la figura.

FIGURA 7.18: Tiempo de enfriamiento en

función de la temperatura final

PROBLEMA 7.2

En un horno de ladrillo se tiene una temperatura final de carbonización de 600°C; en el día la temperatura media exterior es 25°C. A las 12 hora, la temperatura del horno llega a 500°C; en la noche la temperatura es 20°C. En las siguientes 12 horas la temperatura llega a 300°C. Se pide calcular el período de enfriamiento hasta llegar a una temperatura menor a 40°C.

Aplicando la ecuación general de enfriamiento de Newton: $X_t = T_m + (X_o - T_m)\, e^{-kt}$

Se estima el dia de 8am a 8 pm

la noche de 8 pm a 8 am

En la ecuación se define a:

X_t (°C) temperatura luego del tiempo t (12 h)

T_m temperatura exterior (20°C noche, 25°C día)

$X_{o,i}$ (°C) temperaura inicial del día i, al tiempo 0

k constante de la ecuación

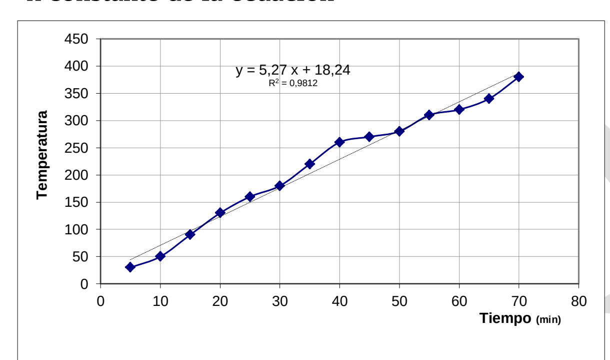


FIGURA 7.19: Tiempo vs. Temperatura en el horno de ladrillo

Primer día: Se estiman las constantes, en base a los datos experimentales

día: $500 = 25 + (600 - 25)\, e^{-12*(k1)}$

$k1 = 0{,}01592$

noche: $300 = 20 + (500 - 20)\, e^{-12*(k2)}$

$k2 = 0{,}04492$

Segundo día: En base a las constantes, día o noche:

$X_t = 25 + (300 - 25)\, e^{-12*0{,}01592} = 252°C$

$X_t = 20 + (252 - 20)\, e^{-12*0{,}04492} = 155°C$

Tercer día: De manera similar:

$X_t = 25 + (155 - 25)\, e^{-12*0{,}01592} = 132°C$

$X_t = 20 + (132 - 20)\, e^{-12*0{,}04492} = 85°C$

Cuarto día: De manera similar:

$X_t = 25 + (85 - 25)\, e^{-12*0{,}01592} = 75°C$

$X_t = 20 + (75 - 20)\, e^{-12*0{,}04492} = 52°C$

Quinto día: De manera similar:

$X_t = 25 + (52 - 25)\, e^{-12*0{,}01592} = 47°C$

$X_t = 20 + (47 - 20)\, e^{-12*0{,}04492} = 36°C$

En base a los resultados anteriores, recien se podría descargar luego del 5to día de enfriamiento.

PROBLEMA 7.3

Estime la ecuación de calentamiento a partir de los siguientes datos de tiempo vs. temperatura de una retorta de destilación seca.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
5	30
10	50
15	90
20	130
25	160
30	180
35	220
40	260
45	270
50	280
55	310
60	320
65	340
70	380

PROBLEMA 7.4

Estime el poder calórico del material volátil de una muestra de carbón cuyo porcentaje de carbono fijo es 83% y el material volátil 11%. El poder calórico del carbón, medido en un calorímetro, es 7850 kcal/kg (cal/g).

Por teoría, tomando como base 1 g de carbón:

1,0 g C ⇒ 7,87 kcal

0,83 g C ⇒ 6,53 kcal

Lo que indica que hay 6530 calorías en el carbón vegetal que corresponden a lo aportado por el carbono fijo. La diferencia (7850 - 6530) = 1320 cal, aportados por el material volátil. Las otras fracciones, cenizas y humedad, no aportan calorías al carbón. La relación calorias vs MV:

1320 cal / 0,11 g = 12000 cal/g

PROBLEMA 7.5

Se tiene la siguiente información sobre 4 métodos de carbonización:

	TPI	colmena	Parva	Fosa
inversión $	300	600	-	-
vida útil años	3	5	-	-
costo $US.	400	700		
personal	2	3	3	4
jornal ($/día)	12	12	8	8
Capacidad m^3_{st}	7	45	30	45
rdto. medio %	24	22	17	20
ciclo (días)	6	12	25	60
#ciclos/año	50	25	12	5
Carbono fijo %	80	80	65	70
precio vta. $/kg	0,30	0,30	0,15	0,20

Requisitos:
Carbono fijo > 70% Cenizas < 5%
humedad < 5% Volátiles <20%

Información general:

1 m^3_{st} = 0,65 m^3 sólido,
madera d.básica 0,60 g/cm^3,
días trabajo año 300,
temperatura max. 500 °C.

Se busca abastecer de carbón vegetal a una planta siderúrgica cuya demanda media es de 100 t/mes. En los hornos metálicos y colmena el trabajo de los operarios es permanente, pero en los otros casos, solo 1 hombre trabaja todo el ciclo y los demás solo lo hacen 5 dias al inicio y 5 al final. Se pide determinar: (a) costo unitario de producción, $US/kg carbón, en cada caso y ganancia neta ; (b) método de carbonización apropiado para satisfacer la demanda de la planta, se asume que la empresa siderúrgica es la que invierte en la producción de carbón ; (c) unidades necesarias del método seleccionado para satisfacer la demanda en forma oportuna.

De acuerdo a los requisitos, ya se debe descartar el método de parvas porque el carbón obtenido con este método presenta un bajo valor de carbono fijo; sin embargo, con fines didácticos, se efectuará el análisis de los 4 métodos.

	Fosas	Parvas	TPI	Colmena
Capacidad: m³ sólido	29,25	19,5	4,55	29,25
*Db =t /ciclo	17,55	11,7	2,73	17,55
Producción carbón (t/ciclo)	3,861	1,989	0,655	3,861
*#ciclos=t/año	19,305	23,868	32,75	96,525
Costo construc. $US/año	-	-	133	140
CU: $US/año/t c.	-	-	4,071	1,450
dias/h/ciclo	100	45	-	-
dias/h/año	500	540	600	900
Costo operarios $US/año CU: $US/ano/t c.	2500 129,5	2700 113,12	3000 91,60	4500 46,62
Suma CU	129,5	113,12	95,67	48,07

En base a 2 criterios se seleccionó el horno de ladrillos colmena.

hornos colmena:

producción 3,861 t/ciclo equivale a 96,525 t/año = 8,04 t/mes

$$\# \text{ hornos} = \frac{100 \text{ t/mes}(1-h)}{8{,}04 \text{ t/mes}} = \frac{100\,(0{,}95)}{8{,}04} = 11{,}81 \approx 12$$

hornos = **12 hornos**

PROBLEMA 7.6

Un horno que trabaja con madera o carbón, para generar vapor, utliza madera con bajo contenido de cenizas, reduciendo el problema de la descarga de este componente; sin embargo el tardío encendido con madera y la producción de volátiles son desventajas comunes. Los volátiles pueden ser reconducidos y eliminados con facilidad. La madera utilizada es de un costo bajo frente al carbón.

Se pide determinar la conveniencia de utilizar madera o carbón, con una especie forestal de densidad básica 600 kg/m³. La madera tiene un costo de preparación (troceado) de 5 $US/m³; al cabo de un mes de secado al aire, la humedad de la madera es 15% (bms). En la obtención del carbón, se utiliza el método de fosa con rendimiento de carbonización de 20%; luego de un mes, se obtiene carbón con 6% de humedad (bms). El costo de producción del carbón es 30 $US/t. Se pide estimar: total de calorias producidas (por m³ y por t); costo energético ($US por 1x$10^6$ kcal).

datos:
PCI de madera (h=15%) 2400 kcal/kg
PCI de carbón (h=6%) 7200 kcal/kg

Análisis:
Comenzando con

	madera	carbón
Madera	1 m³ (r)	1 m³(r)
D básica	0,6	0,6
Madera anhidra	600 kg	600 kg
M seca aire (h=15%)	690 kg	
Rdto. (20%)		120 kg
Carbón (h=6%)		127,2 kg
PCI (kcal/kg)	2400	7200
10^6 kcal/m³ (r) madera	1,656	0,91584
10^6 kcal/t madera anhidra	2,76	1,5264

M_{sa}: madera seca al aire

a) En ambos casos, hay una mayor producción de energía utilizando madera en una proporción de

1,656/0,91584 = 1,8 veces que las obtenidas por el carbón

b) Para el costo de las calorías, seguimos tomando como referencia el m³(r) de madera

	madera	**carbón**
Madera	1 m³ (r)	1 m³(r)
Costo ($US)	5/m³(r)	30/t carbón
Equivalente a	5/690 kg Msa	30/1000 kg carbón
CU ($US/kg)	0,00725	0,03
Equivalente a	2400 kcal	7200 kcal
CU * [(1x10^6)/kcal/kg]	0,00725* [(1x10^6)/2400]	0,03 * [(1x10^6)/7200]
CU ($US/1x$10^6$ kcal)	3,02	4,17

CU: costo unitario
La madera tiene el menor costo energético que el carbón.

SIMBOLOGIA
CMA: crecimiento medio anual del bosque
d : densidad relativa
db: densidad básica
ds: densidad saturada
s/c: madera sin corteza
bms: base materia seca
h : factor de humedad
s : factor de sequedad
CF : carbono fijo
MV : material volátil
t : tonelada métrica (1000 kg)
nota : salvo que se mencione el dato respectivo, para los problemas, el lector debe considerar como días laborables por año 330 y el tiempo de trabajo por día 24 horas.

VIII GASIFICACIÓN DE LA MADERA

8.1 Generalidades

La búsqueda de nuevas fuentes de energía en el presente siglo ha sido y es un tema de mucha importancia tratado con el fin de encontrar alternativas apropiadas frente a los combustibles tradicionales, cuya demanda aumenta día a día con el aumento demográfico y el desarrollo industrial. La biomasa es una de las fuentes más investigadas, con fines energéticos, destacando su caracter renovable. Con este fin, la madera es un recurso que tiene antecedentes de uso energético en combustión, sea como leña o carbón.

Además de la combustión, la gasificación de la madera tiene por objetivo producir un gas combustble, rico en monóxido de carbono (CO), para utilizarlo preferentemente en motores de combustión interna. La idea de la generación de un gas combustible a partir de una fuente carbonácea se desarrollo en el año de 1669 pero su uso práctico se inició en Norteamérica desde comienzos del siglo XX y en un período de 30 años se instalaron mas de 12 mil gasificadores con el fin de proveer de electricidad y luz pública en muchas ciudades de EE.UU. Entre 1930 a 1940 ya se habán instalado mas de un millón de gasificadores para automóviles en todo el mundo (Kaupp, 1984). Durante la 2da Guerra Mundial, muchos países de Europa, ante la escasez de combustibles fósiles, impusieron el uso de los gasificadores: en Suecia el 55% de los camiones y el 70% de los buses funcionaban mediante el uso de los gasificadores. Asimismo, más de 70 mil automóviles funcionaban con gasificadores aunque el uso de estos vehículos fue limitado en número por la escasez de aceites lubricantes y caucho para llantas (Bungay, 1981). En América Latina, se sabe del caso de Brasil que, en la década de 1940, se promulgó una ley que obligaba a que 10% del parque automotor funcione con gasógenos. Luego de la década de 1950, desaparece el auge de los gasógenos en todo el mundo debido al desarrollo de la industria de pétroleo y sus derivados por ser mas conveniente y de mejor desempeño (ELECTROPERÚ-1988).

En la actualidad, la gasificación es una forma de transformación química de la madera que no deja de tener importancia, preveyendo una escasez futura de los combustibles tradicionales. En el Perú, la difusión del uso de los gasificadores de leña o carbón, previa capacitación, puede ser una alternativa para la generación de electricidad en comunidades rurales de Costa, Sierra o Selva que dispongan del recurso forestal suficiente. Estos casos son factibles, obviamente, mientras las comunidades beneficiadas no esten incluídas en programas de electrificación local o regional que utilize otra fuente energética de menor costo (plantas termoeléctricas o hidroeléctricas).

8.2 Definición

La gasificación es un proceso por el cual transforma la madera u otro material lignocelulósico o carbón vegetal en gas combustible através de una reacción de combustión incompleta. El gas obtenido, luego de ser enfriado, filtrado y secado se utiliza como combustible en un motor de explosión o combustión interna (ELECTROPERÚ, 1988).

Usos

El gas pobre obtenido (CO) con alta energía de autopropulsión, es utilizado directamente para la propulsión de vehículos livianos o pesados, o en motores estacionarios de grupos electrógenos. El CO se utiliza en motores de ciclo Otto reemplazando el 100% de la gasolina o en motores de ciclo Diesel, en sistema dual utilizando una mezcla de petróleo/gas de 80/20 o 85/15 (ELECTROPERÚ, 1988).

8.3 Materia Prima para Gasificación

Cualquier material carbonáceo (madera, carbón vegetal o mineral, residuos agrícolas, etc.) pueden utilizarse como materia prima para los gasificadores. Los requisitos recomendados para el caso de:

a) madera

- bajo costo como leña, o residuos de industria;
- bajo contenido de humedad (10 a 30%, bmh)
- preferencia con densidad básica mayor a 0,5;
- dimensiones reducidas, 5 - 50 cm de longitud media, según el tamaño del gasificador;
- bajo contenido de extractivos, en especial de taninos causantes de corrosión en equipos;

b) carbón vegetal

- bajo % de material volátil (menor a 15%)
- bajo contenido de cenizas (menor a 5%)
- de bajo costo de producción
- con dimensiones apropiadas (mayor a 5 cm), según el gasificador, y bajo en contenido de carbonilla, lo que facilita la carga
- deber ser duros y compactos, favoreciendo la duración del proceso

Los constructores de gasógenos suelen recomendar carbón vegetal por las razones siguientes:

- por su facilidad de manipulación y transporte
- mejor eficiciencia en la conversión de carbón a energía: por cada 1 kW-h se requiere de 0,54-0,68 kg de carbón vegetal comparado con madera que requiere de 1,09 a 1,36 kg
- con el carbón se genera un gas combustible con menor contenido de impurezas favoreciendo la vida útil del motor

8.4 Etapas de la Gasificación

Utilizando madera, las etapas de gasificación son las siguientes:

I) **Secado.-** Zona próxima a la carga pero la más alejada a la de la formación del gas. En esta zona ocurre un secado de la madera desprendiéndose agua y extractivos. Esta etapa no corresponde propiamente a una zona de reacción; la temperatura media es de 100 a 150°C. En el equipo, la madera se desplaza por gravedad y el vapor de agua se elimina o atraviesa las siguientes etapas.

II) **Destilación.-** O zona de pirólisis, corresponde a la etapa de descomposición térmica de la carga, formándose carbón, alquitranes, hidrógeno y metano. La temperatura máxima de esta etapa varia de 700 a 800°C.

III) **Oxidación.-** Es la etapa de inicio de la gasificación propiamente dicha. Los compuestos carbonáceos, formados en la etapa anterior, se oxidan. El carbón formado combustiona y los alquitranes se descomponen (cracking) entre 1000 a 1350°C respectivamente. Las reacciones de oxidación del carbono son las siguientes:

(a) $C + \frac{1}{2} O_2 \Rightarrow CO + 2440\ kcal$
(1) (1,33) (2,33)
0,934 m³ 1,867 m³

(b) $CO + \frac{1}{2} O_2 \Rightarrow CO_2 + 5640\ kcal$
(2,33) (1,33) (3,66)
1,867m³ 0,934 m³ 1,867 m³

- $C + O_2 \Rightarrow CO_2 + 8080\ kcal$
(1) (2,66) (3,66)

Los hidrocarburos de la destilación inician su descomposición a partir de los 900°C y concluye a 1350°C; los productos de su descomposición son de menor peso molecular, concluyendo hasta CO⇔ y H⇔O. El O⇔ proviene del aire que ingresa al gasógeno, aportando además nitrógeno y vapor de agua, causando las siguientes reacciones:

(c) $CO + H_2O \Rightarrow CO_2 + H_2 + 445\ kcal$
(2,33) (1,5) (3,66) (0,17)

Y la reacción con el hidrógeno da lugar a la formación de metano:

(d) $C + 2\ H_2 \Rightarrow CH_4 + 1900\ kcal$
(1) (0,33) (1,33)

Todo el calor aportado por las reacciones en esta etapa permiten cubrir las pérdidas por radiación, condensación y calor latente del equipo.

IV) **Reducción**.- Las etapas de oxidación y reducción se presentan de manera simultánea. A diferencia de la etapa anterior, las reacciones de reducción son endotérmicas; el calor es aportado de la etapa de oxidación. La temperatura se eleva hasta valores de 1600 a 1700°C. Las reacciones mas importantes son:

(e) $CO_2 + C + 3240\ kcal \Rightarrow 2\ CO$
3,66) (1) (4,66)

Tambien hay formación del gas de agua (CO y H_2O):

(f) $C + H_2O + 3250\ kcal \Rightarrow CO + H_2$
(1) (1,5) (2,33) (0,17)

Formación de hidrógeno y CO⇔:

(g) $C + 2\ H_2O + 3310\ kcal \Rightarrow CO_2 + 2\ H_2$
(1) (3) (3,66) (0,33)

La producción de hidrógeno tiene importancia por su elevado poder calórico: 35 mil kcal/kg.

La reducción puede iniciarse a los 500°C pero una

velocidad de reacción óptima de reducción se logra a partir de los 800°C. La formación del monóxido de carbono (CO) depende la reactividad del combustible y de su mayor o menor capacidad para reducir el CO_2; sin embargo esta reactividad tambien esta influenciada por la riqueza del hidrógeno y demás componentes volátiles. Tambien se afirma que la reducción es más efectiva mientras la temperatura sea alta, por encia de los 1000°C. Un balance térmico debe garantizar un equilibrio entre el calor liberado en la zona de oxidación y el absorbido en la reducción.

Tal como se indicó anteriormente, las cuatro etapas de la gasificación corresponden al uso de madera. En caso de usar carbón, el proceso se incia con una etapa de transición entre la destilación y la oxidación; se libera una menor cantidad de material volátil y una mayor reactividad del carbón se interpreta por la mayor producción de gas pobre (CO), tal como se muestra en el cuadro 8.1.

CUADRO 8.1: Gases Formados en la Gasificación de Maderas de Coníferas y Latifoliadas

% Composición de Gases					
	CO	H_2	CH_4	CO_2	N_2
Gas de madera					
Coníferas	21,7	18,5	1,8	11	47
Latifoliadas	18-22	18-20	1,5-2	12-15	
Gas de Carbón					
Latifoliadas	31,9	5,6	2,8	2,3	57,6
Lat. + vapor	28,4	13,2	2,1	2	54

en la tabla se observa que el ingreso de vapor de agua en la gasificación del carbón favorece el aumento de la cantidad de hidrógeno en los gases producidos.

8.5 Clasificación de los Métodos de Gasificación

ELECTROPERÚ[26] (1988) propone una clasificación de los gasógenos en función de la dirección del flujo de gas, mencionando tres clases:

- Gasificador de corriente ascendente
- Gasificador de corriente descendente
- Gasificador de corriente cruzada

a) Gasificador de corriente ascendente

Tambien denominad de flujo a contracorriente o de tiro directo. La dirección de entrada de airees contraria a la dirección de alimentación de la materia prima. En estos equipos se utiliza madera que tiene un flujo lento durante su consumo. Los flujos de aire, madera y gas producidos estan en contracorriente. Estos gasógenos son voluminosos y se destinan para generar gas para motores de hasta 660 kW de potencia instalada; requieren de una gran inversión para su construcción. Un gasificador de esta clase con consumo de 400 t (bms) de madera por día puede alcanzar costos de aproximadamente 9 millones dólares US, 1978. Bungay[27] (1981). La principal desventaja de estos equipos es que el gas generado presenta un alto contenido de alquitrán lo que es causa de defectos durante su combustión en el motor de explosión.

b) Gasificador de corriente descendente

Es un método muy utilizado, tambien denominado gasifcador de corriente paralela o de tiro invertido; puede utilizar madera o carbón. El aire se alimenta en dirección radial y el gas formado atraviesa toda la zona incandescente, lo que permite que los productos de destilación se quemen y por consiguiente el gas queda libre de impurezas (compuestos alquitranosos) que afecten el funcionamiento del motor. El movimiento de aire, materia prima y gas producido confluyen en una sóla corriente (co-corriente).

c) Gasificador de corriente cruzada

Tambien denominado gasificador de tiro transversal. En condiciones ideales, la gasificación radial es rápida alcanzando temperaturas entre 1800 a 2000°C. En este caso, el aire ingresa, en dirección radial, por un lado de la cámara de combustión y el gas sale por el lado opuesto. Este equipo utiliza carbón vegetal, de preferencia con buenas características; el gasificador tiene una rápida respuesta a los cambios de carga además de ser de fácil construcción, con dimensiones y peso reducido.

8.6 Generador con Gasificación Descendente (Gasificador de corriente paralela)

8.6.1 Funcionamiento

Tal como se mencionó anteriormente, este equipo muy difundido, trabaja con madera o carbón. Cuando se produce gas combustible, estos gasógenos se adaptan en camiones (utilizando madera) o en automóviles (con carbón). Un gasógeno instalado en el Dpto. de Ucayali, básicamente consta de dos cilindros concéntricos

de un diámetro mayor entre 0,5-0,6 m y una altura de 80 a 100 cm. La carga se efectúa por la tapa, ubicada en la parte superior, y se cierra herméticamente; en el caso de madera, ésta debe atravesar las zonas de secado y de destilación. A la altura de la zona de oxidación se encuentran de 1-2 boquillas de entrada de aire (con o sin alimentación forzada) de 50 a 100 mm de diámetro e inmediatamente bajo estas aberturas, hay un estrechamiento por donde pasan los productos quemados a la zona de reducción. Bajo esta zona se ubica una parrilla de carbón cuya combustión permite mantener una temperatura de óptima para la reducción del CO_2 y formación del CO y H_2 los que ascienden por la cámara libre (espacio entre los cilindros concéntricos). Los gases son evacuados através de un ducto hacia la etapa posterior de ciclonaje y enfriamiento. Los residuos sólidosde combustiónson eliminados por una portezuela ubicada bajo la parrilla. La madera utilizada debe ser troceada a dimensiones aproximadas de 50 x 60 x 80 mm.

El elevado peso de los gasógenos con maderay el gran lastre que representa su funcionamiento y las perturbaciones derivadas de la humedad ha motivado la sustitución de estos gasógenos de madera por los de carbón vegetal. Entre los años 1930 a 1950, hubo un uso importante de los gasógenos de carbón para generar gas combustible en vehículos pequeños; el uso del carbón representó una gran autonomía y facilidad de manipulación.
Un esquema de las etapas del gasificador se muestra en la figura 8.1

8.6.2 Tratamiento del Gas

El gas obtenido en cualquier tipo de gasógenos siempre lleva impurezas sólidas y de gases condensables (agua y alquitranes) y no condensables (CO⇔) razón por la cual deben ser tratados antes de ser utilizados en un motor de explosión. Equipos importantes auxiliares a los gasificadores son ls siguientes (ELECTROPERÚ, 1988):

a) Ciclón.- Equipo metálico, de acero, a donde ingresan los gases, en dirección radial, sirve como decantador de sólidos que salen del gasificador; su valor medio de retención es 5 g de cenizas por m³ de gas producido.

b) Radiador.- Equipo para enfriamiento, al pasar el gas por convección forzada através de este sistema de tuberías dispuestas en paralelo y horizontales. El enfriamiento es favorecido con ayuda de un ventilador, logrando que el gas fluya hacia el motor con una temperatura mayor en 3°C a la temperatura ambiente. Este equipo presenta igualmente una inclinación de 5° en su instalación lo que facilita la evacuación de los gases condensados provenientes de la zona de gasificación.

c) Lavadores de gas.- Internamente hay inyección de agua, por aspersión, que detiene partículas sólidas que se mantienen en suspensión en el gas producido. Este equipo consta de una batería de 2 o más tubos lavadores.

d) Condensadores.- Son trampas de agua con el fin de retener partículas de agua, mezcladas como vapor, que quedan en los gases.

e) Filtros.- Sirrve para retener partículas sólidas de cenizas, muy finas, hasta cinco μm. Este equipo actúa por el pase del gas através de filtros de material sintétitco (poliester).

f) Mezclador aire/gas.- De forma manual o automática, este equipo regula la proporción óptima de la mezcla al ingreso del gas al motor.

8.6.3 Rendimientos de Gasificación

Tomando como base la generación de electricidad, se tiene los siguientes valores referenciales de rendimientos y parámetros de funcionamiento para dos tipos de gasificadores[28] (Gonzales, 1988).

	Tipo de Gasógeno	
	Descendente	Flujo cruzado
Capacidad	30 kW	30 kW
Rendimientos		
kg madera/kW-h	1,1 - 1,4	-
Kg carbón/kW-h	0,5 - 0,7	0,63
Consumo carbón/hora	18 - 20	36 - 38
Carga (kg carbón)	170	1000
Autonomía	9 horas	27 horas

Otra forma de evaluar rendimiento en gasógenos de corriente descendente es referida al trabajo que se obtiene por equivalencia a 1 litro de gasolina (d=0,725) equivalente a 2-2,5 kg de madera o al de 1-1,5 kg de carbón utilizados en un gasógeno.

Con relación a costos, se estima que por cada 1 x 10^6 kcal de energía generadas representa un costo medio entre 16 a 20 dólares US; estimado en base a Bungay (1981).

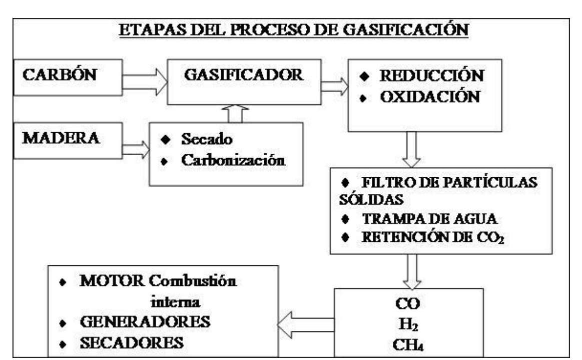


FIGURA 8.1: Etapas del proceso de gasificación

8.7 La Gasificación en el Perú

El primer gasificador de madera, operativo, del cual se tenga referencia[29], se instaló en la comunidad rural de Campo Verde, Ucayali, en 1982. De origen francés, este equipo utilizó desperdicios de aserrío; el gas producido accionaba un generador de corriente eléctrica para la comunidad. La capacidad del gasificador fue de aproximadamente 1,5 m^3; tenia capacidad de funcionamiento contínuo pra desarrollar una potencia en el generador de 30 kW. A la fecha el equipo fue desactivado, pasando a cargo de la Universidad de Ucayali (1990).

En Madre de Dios, la empresa estatal ELECTROPERÚ (1988).[30] , hasta el año de 1988, desarrolló un proyecto para la instalación de 4 gasógenos en las siguientes zonas del dpto. de Madre de Dios: dos en Iñapari (de flujo cruzado, de 30 kW c/u), uno en Chilina (flujo descendente, 30 kW), y uno en San Lorenzo (flujo descendente, de 30 kW). En las tres zonas, el objetvo del proyecto fue producir gas para generar energía eléctrica para consumo doméstico de las poblaciones.

8.8 PROBLEMAS

Problema 8.1

Del balance general de las ecuaciones de gasificación se tiene:

Oxidación

$2\ C + CO + O_2 + H_2 + H_2O \Rightarrow 2\ CO_2 + CH4 + 10425\ kcal$

Reducción

$CO_2 + 3C + 3\ H_2O + 9800\ kcal \Rightarrow 3\ CO + 3H_2 + CO_2$

Se pide determinar:

- la ecuación general de oxido-reducción:
- Calorías disponibles por mol de C luego de las reacciones
- Calorías consumidas para formar 1 kg de CO

(a) Ecuación general resultante del balance entre las ecuaciones de oxidación y reducción

$$5\ C + O_2 + 4\ H_2O \Rightarrow 2CO + 2\ H_2 + 2\ CO_2 + CH4 + 625\ kcal$$

(b) Calorías por kg de carbón
% C ⇒ 625 kcal

La ecuación esta referida a la base de 1 kg de carbón, por consiguiente hay

625/(5*1) = 125 kcal/kg carbón de energía disponible
Referido a masa molecular:

$$\frac{125000}{1000\ g\ C} * 12 = 1500\ cal/mol\ de\ C$$

c) Calorías consumidas para formar 1 kg de CO
En base a la ecuación de reducción:
9800 kcal ⇒ 3 kg CO

En base a 1kg de C, entonces el CO sería

$$\frac{1\ mol\ CO}{1\ mol\ C} = \frac{28}{12} = 2,3\ \ kg$$

Luego, las 980 kcal corresponden a (3)*(2,33) = 6,99

9800 kcal ≈ 7 kg CO
Y las calorías consumidas serían

$$\frac{1\ 400\ 000\ cal}{7000\ g\ CO} * 28 = 5600\ cal/mol\ de\ CO$$

Problema 8.2

En un gasificador de corriente descendente se tiene un consumo medio de 170 kg de carbón por carga lo que otorga una autonomía de 9 horas de trabajo contínuo. El poder calórico del carbón es de 7200 kcal/kg; además, para mantener una temperatura óptima de reducción, hay un aporte de 10000 kcal por carga (equivalente a 1,38 kg de carbón). El

rendimiento del gasificador es de 0,6 kg de carbón por 1 kWh obtenido en el generador.

Se pide calcular:

- Energía consumida, como calor, en el gasificador (incluídas las pérdidas por radiación, conducción, etc.).
- Energía total producida, en kWh, por toda la carga.
- Potencia del generador.

ESQUEMA DE GENERACIÓN DEL GAS

a) Energía de entrada (por carga):

170 kg x 7200 kcal/kg = 1 224 000 kcal
aporte en reducción 10 000 kcal
Total: 1 234 000 kcal

Energía de salida
1kW-h (860,4 kg) ⇒ 0,6 kg carbón

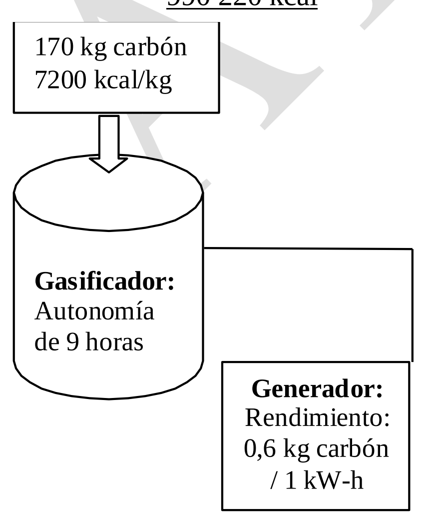
Por regla de tres:

0,6 kg carbón —— 860,4 kcal
170 kg —— X

$$X = \frac{170 * 860,4}{0,6} = 243\ 780 \text{ kcal}$$

Luego

Energía consumida = Energía entrada - Energía salida
= 1 234 000 - 243 780
= 990 220 kcal



b) Energía generada, en base a la energía de salida

$$\frac{243\ 780 \text{ kcal}}{860,4 \text{ kcal/kW-h}} = \underline{283,3 \text{ kW-h/carga}}$$

c) Potencia instalada del generador

$$\frac{283,3 \text{ kW-h/carga}}{9 \text{ h/carga}} = 31,47 \approx \underline{31,5 \text{ kW}}$$

Equivalencias:
1 kW-h = 860, 4 kcal
= 3,6 x 10^6 joules
= 3412, 3 BTU
367 100 kg-m

Bibliografía

ONU. *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de Todas las Actividades Económicas*. Informe Estadístico, New York: ORGANIZACIÓN NACIONES UNIDAS, 2002, 296 pp.

[1] Wilson, Loomis. (1974). Botánica. UTEHA. México
[2] Caruso, L.; Jones, P. (1995). Dictionaire visuel pour tous. Ed. Gallimard Jeunesse, ed. française, París, 589 pp.
[3] Britt, W. (1969). Handbook for Pulp and Paper Technologists.
[4] Stamm. Wood and Cellulose Science

[5] Glasser
[6] Rydholm, S. (1969). Pulping Processes

[7]) CASEY, J. (1988). Introducción a la Producción de Pulpas. Pulpa y Papel: Química y Tecnología Química. vol I. Cap. 4. pp. 209-217.
[8]) ZILL, . (1986). Ecuaciones Diferenciales.
[9]) CASEY, J. (1988). Producción de Pulpa Alcalina. Pulpa y Papel: Química y Tecnología Química. vol I. Cap. 4. pp. 456-464.
[10]) CASEY, J.
[11]) BRITT, k. (1970). Handbook of Pulp and Paper Technology. 2nd Edit. Van Nostrand Reinhold Co.
[12] Steierer,F. (2011). Highlights on Wood Fuel. FAO Forestry Dep, roma.ForesSTAT, released on 12 January 2011
[13] CARUSO, L.; JONES, P. (1995). Dictionaire visuel pour tous. Ed. Gallimard Jeunesse, Ed. française, París. 589 pp.
[14] WIKIPEDIA. "Antracita". URL: http://es.wikipedia.org
[15] WIKIPEDIA. "Lignito". URL: http://es.wikipedia.org
[16] PIPA, E., CHAVESTA, M., GONZALES, E. (2007). Metodología para identificar especies utilizadas en la obtención de carbón vegeteal. Rev. Anales científicos, UNALM.
[17]. FAO (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Estudio FAO-Montes, FAO/SIDA. Vol. 41. 154 pp.
[18] REMIGIO, D. (1983). Rendimiento y Calidad de Carbón: análisis del líquido piroleñoso de cuatro maderas del Perú. Tesis Ing. Forestal, Universidad Agraria, Lima. 78 pp.
[19] Huard, M. (1997). Charbon de bois franc Basques. (www.globettrotter.qc.ca/felixhuard/basques)
[20] Reed, T. (1997). Gas-L: Re: Charcoal, yes or no ?.(www.crest.org/renewables/gasification-list-archive/msg00084.html).
[21] EL COMERCIO (1998). "INDECOPI inicia investigación por dumping en carburo de calcio". Nota periodística, 20 febrero 1998. Lima.

Rojas, F. «Integración Bosque Industria: Una necesidad regional.» *Madera y Bosques* 1, nº 1 (1995): 5-7.

BIBLIOGRAFIA

[22] PANSHING, . (1959). Los Productos Forestales

WILSON, C. (1968). Botánica. Capítulo 25. UTEHA, México. 682 pp.
SON WIBERG, S. (1976). Carbón. Enciclopedia Técnica Combi, Tomo I. Ed. Danae, Barcelona.

GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (1984). The Industrial Wood Energy Handbook. Van Nostrand R. Co. New York. 240 pp.
WINNACKER, K.; Wingaertner, E. (1958). Tecnología Química: Química Industrial Orgánica. Tomo V. Ed. Gilli, Bilbao. 633 pp.

[23] WENZL, H. (1970). The Chemical Technology of Wood. Academy Press, New York. 692 pp.
[24] PINO, M. (1987). Destilación Seca de Madera de 4 Categorias diamétricas de *Eucalyptus globulus* de una plantación de Cajamarca. Tesis Ing. Forestal, Universidad Agraria, Lima. 94 pp.
[25] DEVORE, G. (1976). Química Orgánica. Capítulo 54. Public. Cultural, México. 734 pp.
[26] ELECTROPERÚ (1988) . Gasógenos. Gerencia de la Oficina de Energías No Convencionales, Lima. s/p.
[27] BUNGAY, H. (1981). Energy, The Biomass options. New York, Rensselaer Polytechnic Institute Troy. 347 pp.
[28] GONZALES, E. (1988). Abastecimiento de carbón vegetal para la planta de electrogasógenos de Iñapari, Chilina y San Lorenzo. Parte IV: Plan de transformación. Proyecto Especial Madre de Dios II Etapa. UNALM, Lima, 20 pp. (inédito).
[29] GONZALES, E. (1983). La Transformación Química Forestal en el Perú. Dpto. Industrias Forestales, UNALM, Lima. 14 pp.

[30] ELECTROPERÚ (1988) . Gasógenos. Gerencia de la Oficina de Energías No Convencionales, Lima. s/p.

KAUPP, A. (1984). Gasification of rice hulls. Theory and Praxis. Eschborn-RFA. GATE-GTZ. 303 pp.

HUNT, V. (1979). Diccionario de Energía. Pub. Marcombo, Barcelona, 516 pp.

FAO (2001). Unified Bioenergy Terminology. Roma.

URL :. http://www.fao.org/DOCREP/007/j4504E/j4504e00.htm#TopOfPage